

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

на тему: «Дослідження інформаційної ефективності
безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11n/ac»

Виконав:

студент VI курсу, групи ТС-61м

Чекунов Микола Віталійович

_____ Керівник:

Ст. викладач

Осипчук С.О.

_____ Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць ін-
ших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(172.3620.1 «Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Чекунову Миколі Віталійовичу

1. Тема дисертації «Дослідження інформаційної ефективності безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11n/ac», науковий керівник дисертації Осипчук Сергій Олександрович, старший викладач, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації

3. Об'єкт дослідження - безпроводові мережі на основі стандартів IEEE 802.11n/ac.

4. Предмет дослідження - інформаційна ефективність безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів 802.11n/ac.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Аналіз сучасних технологій побудови безпроводових мереж, а також стандартів IEEE 802.11;
2. Проаналізувати стандарти 802.11 і місце стандартів 802.11n/ac в моделі OSI;

3. Огляд параметрів, що впливають на інформаційну ефективність в сучасних безпроводових мережах;
4. Побудувати імітаційну модель для дослідження алгоритму перемикавання сигнально-кодових конструкцій в стандартах 802.11n/ac;
5. Дослідити алгоритм перемикавання сигнально-кодових конструкцій за допомогою сучасних засобів безпроводового зв'язку;
6. На основі даних дослідження зробити пропозиції щодо поліпшення інформаційної ефективності у стандартах 802.11.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Плакат №1 «Тема, мета, об'єкт, предмет та задачі дослідження магістерської роботи»

Плакат №2 «Результати оцінки інформаційної ефективності в імітаційній моделі для стандарту 802.11n»

Плакат №3 «Результати оцінки інформаційної ефективності в імітаційній моделі для стандарту 802.11ac»

Плакат №4 «Практичне дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11n/ac»

Плакат №5 «Пропозиції підвищення інформаційної ефективності безпроводових систем передавання інформації на основі стандартів IEEE 802.11n/ac»

Плакат №6 «Висновки по виконаній роботі»

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. Урывский Л.А., Осипчук С.А., Чекунов Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА 802.11n // XI МНТК «Проблеми телекомунікацій», ІТС НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», м. Київ, 2017.
2. Chekunov M., Osypchuk I., Kyrashchuk V., Osypchuk S. Theoretical research and practical design of IoT testbed solution based on ESP8266 SOC and blank components // Twelfth International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS"

9. Дата видачі завдання 10 вересня 2016 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Написання та оформлення перших етапів дипломної роботи	30.09.2017	Виконано
2	Практичне дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11 n/ас виробника Mikrotik та аналіз результатів	31.10.2017	Виконано
3	Пропозиції щодо підвищення інформаційної ефективності безпроводових систем передавання інформації на основі стандартів IEEE 802.11 n/ас	15.11.2017	Виконано
4	Підготовка і подача заявки на Патент України на корисну модель або винахід	31.12.2017	Виконано
5	Підготовка і подача результатів дослідження для їх апробації на участь у міжнародній конференції ПТ-2018, м. Київ	15.02.2018	Виконано
6	Оформлення дипломної роботи	31.04.2018	Виконано

Студент

Чекунов М.В.

Науковий керівник дисертації

Осипчук С.О.

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 83 с., 9 рис., 14 табл., 34 джерела.

Актуальність обраної теми обумовлена тим, що кількість користувачів бездротових систем передачі постійно зростає, а ресурси технології бездротового з'єднання обмежені. Одночасне зростання навантаження на бездротові комунікації і відсутність глобальних можливостей розширення ресурсів бездротових каналів зв'язку вимагає підвищення інформаційної ефективності бездротової системи передачі, тобто збільшення обсягів інформації, що передається в розрахунку на кожну одиницю ресурсу.

Стандарти 802.11n/ac є сучасними стандартами безпроводового зв'язку, які забезпечують велику швидкість передачі даних, що задовільняє вимоги всіх сучасних послуг та додатків.

Метою дослідження є підвищення інформаційної ефективності стандартів 802.11n/ac за допомогою алгоритму зміни сигнально-кодових конструкцій в залежності від енергетики сигналу, що передається.

Об'єкт дослідження - безпроводові мережі на основі стандартів IEEE 802.11n/ac.

Предметом дослідження є інформаційна ефективність безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів 802.11n/ac.

В даній роботі було розглянуто еволюцію безпроводового зв'язку та відзначено безпосереднє місце стандартів IEEE 802.11 у сучасних телекомунікаціях.

Для теоретичної оцінки інформаційної ефективності було побудовано імітаційну модель у програмному забезпеченні MATLAB. В ній фіксуються вхідні параметри пов'язані з вибраними стандартами, стеком протоколів TCP/IP та засобами безпроводового зв'язку. Для кожного стандарту обирається набір сигнально-кодових конструкцій, тобто набору типу модуляції та швидкості завадостійкого кодування. Як результат моделювання, ми отримали певний алгоритм перемикання сигнально-кодових конструкцій залежно від енергетики сигналу для отримання максимальної інформаційної ефективності.

Окрім теоретичного дослідження, було проведено і практичне. Для цього була зібрана експериментальна схема за допомогою сучасного обладнання Mikrotik. Було підраховано рівень інформаційної ефективності залежно від рівня енергетики та сигнально-кодової конструкції, що використовується та побудовано графік цієї залежності.

Було проведено порівняння результатів досліджень за допомогою імітаційної моделі у програмному середовищі Matlab та експериментальної схеми. Як результат роботи запропоновано покращити алгоритм перемикання сигнально-кодівих конструкцій у стандартах 802.11n/ac.

За результатами роботи оприлюднено дві науково-технічні статті: у міжнародній конференції 2017 року та у дванадцятій міжнародній конференції “Проблеми телекомунікацій” 2018 року.

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні впливу всіх сигнально-кодівих конструкцій на інформаційну ефективність у стандартах 802.11 n/ac.

БЕЗПРОВОДОВІ СИСТЕМИ ЗВ’ЯЗКУ, ІНФОРМАЦІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БЕЗПРОВОДОВИХ ЗАСОБІВ ЗВ’ЯЗКУ, СТАНДАРТИ 802.11N/AC, СИГНАЛЬНО-КODOVІ КОНСТРУКЦІЇ.

ABSTRACT

The relevance of the chosen topic is due to the fact that the number of users of wireless transmission systems is constantly increasing, and the resources of the wireless connection technology are limited. The simultaneous growth of the burden on wireless communications and the lack of global opportunities for expanding the resources of wireless communication channels requires an increase in the information efficiency of a wireless transmission system, that is, an increase in the amount of information transmitted per unit of resource.

802.11n/ac standards are modern wireless communication standards that provide high data rates that meet the demands of all modern services and applications.

The purpose of the study is to increase the information efficiency of 802.11n/ac standards by using the algorithm of signal-code design changes depending on the energy of the transmitted signal.

The object of the study is wireless networks based on IEEE 802.11n/ac standards.

The subject of the study is the informational efficiency of wireless communication based on 802.11n/ac standards.

In this paper the evolution of wireless communication was considered and the direct place of IEEE 802.11 standards in modern telecommunications was noted.

For the theoretical evaluation of information efficiency, an imitation model was built in the Matlab software. In this model the input parameters associated with selected standards are fixed. For each standard, a set of signal-code designs is selected, that is, a set of modulation type and speed of an anti-noise coding. As a result of the simulation, we received a certain algorithm for switching signal-code designs depending on the energy of the signal to obtain maximum information efficiency.

In addition to the theoretical study, it was conducted and practical. For this purpose, an experimental scheme with the help of modern equipment Mikrotik was assembled. The level of information efficiency was calculated based on the energy

level and the signal-code structure used and the plot of this dependence was constructed.

A comparison of the research results with the simulation model was performed. As a result of the work, it is proposed to improve the switching algorithm of signal-code structures in the standards of 802.11n/ac.

As a result of the work, two scientific and technical articles were published: in the 2017 international conference and in the twelfth international conference "Telecommunication problems", 2018.

The scientific novelty of the work is to investigate the impact of all signal-code structures on information efficiency in the 802.11 n/ac standards.

WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS, INFORMATIONAL EFFICIENCY, 802.11N/AC STANDARDS, MODULATION AND CODING SCHEMES.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	11
ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. Обґрунтування доцільності дослідження інформаційної ефективності безпроводових засобів зв'язку	17
1.1. Розвиток систем передавання інформації	17
1.2. Тенденції розвитку безпроводових засобів зв'язку	20
1.3. Стандарти IEEE 802.11 та їх місце в безпроводових системах передавання інформації.....	25
1.4. Вибір і обґрунтування критеріїв інформаційної ефективності для безпроводових засобів зв'язку.....	28
Висновки до розділу 1	31
РОЗДІЛ 2. Стандарти IEEE 802.11 та їх характеристики	32
2.1 Види стандартів IEEE 802.11 та їх розвиток	32
1.5. Характеристики і параметри стандартів IEEE 802.11, що використовуються для оцінки інформаційної ефективності засобів безпроводового зв'язку.....	34
2.3 Вибір засобів безпроводового зв'язку для дослідження інформаційної ефективності та їх характеристики	43
Висновки до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3. Теоретичне дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11	47
3.1 Розробка імітаційної моделі оцінки інформаційної ефективності засобів зв'язку в середовищі MatLab	47
3.2 Цільовий функціонал для оцінки інформаційної ефективності	50

3.3	Результати оцінки інформаційної ефективності в імітаційній моделі для різних наборів вхідних параметрів.....	53
3.3.1	Результати оцінки для наборів вхідних параметрів стандарту IEEE 802.11n.....	53
3.3.2	Результати оцінки для наборів вхідних параметрів стандарту IEEE 802.11ac	57
	Висновки до розділу 3	60
РОЗДІЛ 4.	Практичне дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11n/ac виробника Mikrotik.....	61
4.1	Схема випробувань, вимірювані параметри та сценарій дослідження.....	61
4.2	Результати практичного дослідження інформаційної ефективності ..	64
	Висновки до розділу 4	66
РОЗДІЛ 5.	Шляхи підвищення інформаційної ефективності безпроводових систем передачі.....	67
5.1	Порівняння результатів практичного дослідження та теоретичної оцінки інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802n/ac	67
5.2	Пропозиції підвищення інформаційної ефективності безпроводових систем передавання інформації на основі стандартів IEEE 802.11n/ac	68
	Висновки до розділу 5	69
	ВИСНОВКИ.....	70
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73
	ДОДАТОК А. КОД ПРОГРАМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СТАНДАРТІВ 802.11 N/AC У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕНІ MATLAB.....	77

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ACK	Acknowledgement – підтвердження
AP	Access Point – точка доступу
BPSK	Binary Phase-shift keying – Двійкова фазова маніпуляція
BSS	Basic Service Set - базова зона обслуговування
CDMA	Code Division Multiple Access- множинний доступ з кодовим розділенням каналів
CSMA/CA	Carrier sense multiply access with collision avoidance - методом колективного доступу з контролем несучої і запобігання колізіям
CTS	Clear to send
DS	Distribution System - розподільча система
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution – модернізація GPRS
ETSI	European Telecommunications Standards Institute - Європейським Інститутом Стандартів Телекомунікацій
GPRS	General Packed Radio System - технологія безпроводової передачі пакетних даних
GSM	Global System for Mobile Communications - міжнародний стандарт для мобільного цифрового стільникового зв'язку
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access - доступ високошвидкісного приймання пакетних даних
HSPA	High Speed Packet Access - Протокол високошвидкісного пакетного доступу
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers - міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості
LLC	Link Local Control
LTE	Long-Term Evolution – довгостроковий розвиток

MAC	Media Access Control – управління доступом до середовища
MAN	Metropolitan Area Network – міська мережа
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output – технологія багатоканальний вхід / вихід
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексування з ортогональним розділенням каналів
OSI	Open Systems Interconnection Basic Reference Model - базова еталонна модель взаємодії відкритих систем
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy- Плезіохронна цифрова ієрархія
PHY	Physical layer – фізичний рівень моделі OSI
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція
QPSK	Quadro Phase-shift keying – Квадратурна фазова маніпуляція
RTS	Ready to send
SDH	Synchronous Digital Hierarchy - Синхронна цифрова ієрархія
SDMA	Space Division Multiple Access – множинний доступ з просторовим розділенням каналів
TDM	Time Division Multiplexing – мультиплексування з поділом за часом
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System - універсальна система мобільного зв'язку
WARC	The World Administrative Radio Conference - всесвітньої адміністративної радіоконференції
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access - Широкопasmовий Багатостанційний Доступ з Кодовим Розділенням
WDM	Wavelength Division Multiplexing – мультиплексування з поділом за довжиною хвилі
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

WPA	Wi-Fi Protected Access - один з протоколів безпеки для захисту безпроводових мереж
БПМ	Багатопозиційна модуляція
ВОЛЗ	Волоконно-оптична лінія зв'язку
ВОСП	Волоконно-оптична система передачі
ЕІВП	Ефективна ізотропно випромінювана потужність
ІМ	Імітаційна модель
ЛЗ	Лінія зв'язку
ПЦІ	Плезіонхронна цифрова ієрархія
СКК	Сигнально-кодова конструкція
СЦІ	Синхронна цифрова ієрархія

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

η	Інформаційна ефективність
N_0	Спектральна щільність потужності білого шуму
P_b	Ймовірність помилкового прийому
$h_{\text{нрм}}^2$	Енергетичний параметр каналу зв'язку в точці прийому
M	Число позицій у сузір'ї багатопозиційної модуляції
P_c	Середня потужність сигналу
$P_{\text{ш}}$	Середня потужність шуму
G_r	Коефіцієнт підсилення приймаючої антени
G_t	Коефіцієнт підсилення передаючої антени
P_t	Потужність випромінювання передавача
V_s	Швидкість джерела повідомлень
r_k	Швидкість завадостійкого кодування
tcp_{red}	Коефіцієнт збитковості стеку протоколів TCP/IP
R_{δ}	Продуктивність дискретного каналу
C_n	Пропускна здатність неперервного каналу
ΔF	Полоса використовуваних частот
$P_{\text{нрм}}$	Потужність сигналу в точці прийому
E_{δ}	Енергія, яка витрачається на передачу одного біту інформації
T_{δ}	Час передачі джерелом одного біту інформації
V_c	Канальна швидкість
f_n	Центральна частота
H	Ентропію одиночного двійкового символу джерела
m	Індекс модуляції
β	Показник енергетичної ефективності
γ	Показник частотної ефективності

ВСТУП

На сьогоднішній день надання надійних і якісних телекомунікаційних послуг - основне завдання будь-якого оператора і провайдера. При цьому доступ до них не повинен бути обмежений прив'язкою до робочого місця. Все частіше користувачі мають необхідність до використання таких послуг в готелях, ресторанах, аеропортах, навіть на зупинках громадського транспорту. Тому безпроводові мережі [7] передачі даних стають все більш популярними. Багато в чому це пов'язано з тим, що при розумній ціні вони забезпечують достатню для більшості додатків швидкість передачі даних. Основною перевагою безпроводових мереж є відсутність кабельної інфраструктури, що дозволяє реалізувати мережевий проект в короткі терміни і зменшити витрати на побудову системи, а також дозволяє одночасно користуватися послугами багатьом абонентам, що рухаються, якщо вони знаходяться в радіусі дії мережі. Також, суттєвим фактором, що вплинув на розвиток безпроводових технологій є можливість їх використання домашнім користувачам.

Актуальність обраної теми обумовлена тим, що кількість користувачів бездротових систем передачі постійно зростає, а ресурси технології бездротового з'єднання обмежені. Одночасне зростання навантаження на бездротові комунікації і відсутність глобальних можливостей розширення ресурсів бездротових каналів зв'язку вимагає підвищення інформаційної ефективності бездротової системи передачі, тобто збільшення обсягів інформації, що передається в розрахунку на кожен одиницю ресурсу.

Підвищення інформаційної ефективності може бути досягнуте через розробку алгоритму зміни сигнально-кодових конструкцій в залежності від енергетики сигналу, що передається. Саме такий шлях розглядається у даній роботі.

Об'єкт дослідження - безпроводові мережі на основі стандартів IEEE 802.11n/ac.

Предметом дослідження є інформаційна ефективність безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів 802.11n/ac.

Проблема, що вирішується – підвищення інформаційної ефективності безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів 802.11n/ac.

Мета - підвищення інформаційної ефективності стандартів 802.11n/ac за допомогою алгоритму зміни сигнально-кодових конструкцій в залежності від енергетики сигналу, що передається. Для досягнення мети дипломної роботи поставлено наступні завдання:

- Аналіз сучасних технологій побудови безпроводових мереж, а також стандартів IEEE 802.11;
- Проаналізувати стандарти 802.11 і місце стандартів 802.11n/ac в моделі OSI;
- Огляд параметрів, що впливають на інформаційну ефективність в сучасних безпроводових мережах;
- Побудувати імітаційну модель для дослідження алгоритму перемикання сигнально-кодових конструкцій в стандартах 802.11n/ac;
- Дослідити алгоритм перемикання сигнально-кодових конструкцій за допомогою сучасних засобів безпроводового зв'язку;
- На основі даних дослідження зробити пропозиції щодо поліпшення інформаційної ефективності у стандартах 802.11.

Методами для вирішення поставлених завдань є:

- Аналіз літератури;
- Аналіз стандартів 802.11n/ac;
- Побудова імітаційної моделі;
- Організація безпроводової мережі на основі стандартів 802.11n/ac.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що на основі імітаційної моделі та сучасного обладнання, побудованого згідно стандартів 802.11n/ac досліджується алгоритм перемикання сигнально-кодових конструкцій та надається висновок щодо можливого підвищення інформаційної ефективності в безпроводових системах зв'язку на основі стандарту 802.11n/ac.

РОЗДІЛ 1. Обґрунтування доцільності дослідження інформаційної ефективності безпроводових засобів зв'язку

1.1. Розвиток систем передавання інформації

Історія розвитку систем передачі інформації, яка триває вже більше століття, включає в себе чимало інноваційних відкриттів і винаходів. Такі системи поступово еволюціонували в область все більш високих швидкостей передачі, ставало більш надійними, простішими в експлуатації, управлінні та забезпеченні необхідної пропускної здатності.

Перша аналогова система передачі, а саме телефонна лінія, була відкрита для експлуатації в 1915 році, яка була побудована на мідному кабелі. Через двадцять років вже була побудована лінія далекого зв'язку на коаксіальному кабелі, що дозволяє мультиплексувати безліч аналогових телефонних каналів. Пізніше була побудована радіорелейна лінія, з часом був запущений перший супутник зв'язку, що було альтернативою дорогим кабельним лініям.

Наступним етапом еволюції систем передачі інформації [2] був перехід від аналогових систем, які використовували частотний поділ каналів, цифрових з тимчасовим поділом каналів. Цей крок ознаменувався появою плезіохронної цифрової ієрархії (ПЦІ, Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH). Базовим каналом в ієрархії цифрових систем PDH був основною цифровий канал зі швидкістю 64 кбіт / с, цифровий еквівалент каналу тональної частоти в аналогових системах передачі. Перехід до цифрових систем передачі і заміна мідних кабелів на волоконно-оптичні супроводжувалися збільшенням пропускної спроможності і істотним поліпшенням експлуатаційних характеристик систем передачі.

На зміну плезіохронним цифровим системам прийшли системи синхронної цифрової ієрархії (СЦІ, Synchronous Digital Hierarchy, SDH) зі швидкос-

тями передачі, рівними сотням і тисячам Мбіт / с. Ці системи, також використовують принцип ВРК, були розраховані на широке застосування волоконно-оптичних кабелів.

Поштовхом до розвитку оптичних систем передачі [1] інформації з'явився винахід в 1960 році А. М. Прохоровим, Н. Г. Басовим (СРСР) і Ч. Таунсом (США) квантового генератора оптичного випромінювання лазерів.

У 1970 році компанією CORNING (США) було створено оптичне волокно з малими (на той час) кілометровими втратами (менш 20 дБ / км на довжині хвилі 0,85 мкм). У тому ж році співробітниками Ленінградського фізико-технічного інституту під керівництвом Ж. І. Алфьорова були розроблені напівпровідникові прилади на основі подвійних гетероструктур, в тому числі напівпровідникові лазери, що працюють в безперервному режимі при кімнатній температурі. З цього моменту почалося швидке розвиток волоконно-оптичних систем передачі інформації. До середини 70-х років втрати в оптичних волокнах були знижені до 2,5-3 дБ / км в першому вікні прозорості (780-870 нм) оптичного діапазону і в СРСР, США, Японії, Англії, Франції та Німеччини були побудовані перші комерційні волоконно-оптичні системи зі швидкостями передачі 2, 048, 8,848 Мбіт / с і 34 Мбіт / с, а також системи кабельного телебачення. Ці системи працювали в діапазоні 1280-1360 нм по багатомодовим оптичним волокнам. Багатомодові волокна мають дуже низьку смугу пропускання - не більше 1200-1600 мггц / км, яка вже тоді була недостатньою. Тому зусилля дослідників були спрямовані на створення одномодових оптичних волокон, смуга пропускання яких на багато порядків вище. В результаті в кінці 70-х років були отримані одномодові волокна з коефіцієнтом втрат 0,2 дБ / км на довжині хвилі 1550 нм (третє вікно прозорості).

Завдяки різкому поліпшенню параметрів систем передачі докорінно зросла якість традиційних послуг зв'язку та з'явилися нові послуги: цифрове телебачення підвищеної чіткості, інтерактивне кабельне ТБ, відеоконференції, передача технологічної, комерційної, банківської інформації, мережу інтернет, електронна пошта, телефакс, телемедицина і т.д. Зростання якості та кількості

послуг зв'язку супроводжується експонентним зростанням числа споживачів цих послуг абонентів.

Потреба в подальшому нарощуванні пропускної здатності систем передачі інформації стимулювала дослідження в напрямку пошуку нових методів вирішення цього завдання. Одним з надзвичайно ефективних рішень поставленого завдання є збільшення пропускної здатності за допомогою ущільнення оптичних каналів по довжинах хвиль оптичного випромінювання WDM (Wavelength Division Multiplexing). Використання цього методу дозволило підвищити пропускну здатність волоконно-оптичних систем до величини більше 10 Тбіт / с, що перевищує потреби сьогодення, знявши таким чином проблему на найближчі 3-5 років.

Стрімкий розвиток волоконно-оптичних і квантово-оптичних технологій для ВОЛЗ триває. В останні 2-3 роки для збільшення довжини регенераційних секцій магістральних ВОСП активно впроваджуються волоконні оптичні підсилювачі, робота яких заснована на нелінійному оптичному явищі - вимушеному комбінаційному розсіянні. Проводяться інтенсивні дослідження нового типу оптичних волокон т. Н. мікроструктурованих волокон і фотонних кристалів, на основі яких прогнозується створення нових типів оптичних елементів.

Поширення оптичних систем в усі сегменти мережі. Починаючи з моменту комерційного застосування, системи передачі на базі оптичних компонентів широко використовувалися для побудови магістральних мереж - національних, континентальних, глобальних. Однак, в даний час оптичні транспортні системи стають основою регіональних мереж і міських мереж в мегаполісах і великих містах, де можна бачити все більше число волоконно-оптичних мереж, чия пропускну здатність активно використовується абонентами квартирною і ділового секторів. В даний час спостерігається все більш широке застосування систем на базі волоконно-оптичних кабелів в мережах доступу, однак, для повного переходу на оптику в мережах доступу потрібно досить великий термін.

1.2. Тенденції розвитку безпроводових засобів зв'язку

Загальною тенденцією розвитку комп'ютерних мереж в останні роки є поступова заміна проводових мереж їх безпроводовими аналогами. Це прос-тежується на всіх рівнях - від комп'ютерних і периферійних інтерфейсів до ма-гістральних мереж, від передачі інформації до голосової і відеотелефонії.

У сучасному світі практично не залишилося електронних пристроїв не по-в'я-заних між собою або глобальною мережею Інтернет. До мереж підключається все: від звичних нам мобільних телефонів до ядерних реакторів і космічних апаратів. Можна пов'язати в загальну мережу будь-який пристрій в офіс або квартирі, якщо це матиме хоч найменший сенс. Внаслідок високих темпів по-ширення мобільних пристроїв засоби безпроводового доступу стають як ні-коли актуальними і, очевидно, будуть залишатися такими в майбутньому.

Для того, щоб проаналізувати один конкретний вид безпроводової ме-режі, слід розглянути історію розвитку безпроводових мереж і сучасні техно-логії їх побудови.

Розвиток 3G зв'язку почався в 1992 році [4], коли на засіданні всесвітньої адміністративної радіоконференції (WARC-92) смуги частот 1885...2025 МГц і 2110 ... 2200 МГц загальною шириною 230 МГц були розподілені для ІМТ-2000. Пізніше, у 2000 році були також додатково розподілені смуги частот: 806 ... 960 МГц, 1710 ... 1885 МГц і 2500 ... 2690 МГц [3].

Еволюційний перехід від мереж 2-го до мереж 3-го покоління передбача-лося здійснити через використання технології безпроводової передачі пакет-них даних (General Packed Radio System, GPRS), подальшу її модернізацію (Enhanced Data rates for GSM Evolution, EDGE) і вихід на технології радіодос-тупу, що забезпечують швидкість передачі до 2 Мбіт / с. Для цього був ство-рений спільний міжнародний проект партнерства третього покоління (Third Generation Partnership Project, 3GPP).

Однією з перших технологій стільникового зв'язку розробленої Європей-ським Інститутом Стандартів Телекомунікацій (ETSI) для впровадження 3G в

Європі є універсальна система мобільного зв'язку (Universal Mobile Telecommunication System, UMTS [15].

UMTS - це високошвидкісна передача даних, Мобільний Інтернет, різні додатки на основі Інтернету, інтернету і мультимедіа. Ключовою технологією для UMTS є Широкосмуговий Багатостанційний Доступ з Кодовим Розділенням (WCDMA)[29].

Системи WCDMA / UMTS включають вдосконалену базову мережу GSM і радіоінтерфейс за технологією WCDMA. У мережах UMTS, для передачі даних використовують технологію HSDPA і більш досконалу HSPA + [23].

У системах UMTS використовується динамічний розподіл ресурсів. Поділ користувачів відбувається завдяки кодами скремблювання і каналним кодами. Коди використовуються для двох цілей: для поділу каналів / користувачів; поширення даних через всю смугу частот. Це дозволяє оператору підвищити ефективність використання інфраструктури мультисервісних ліній зв'язку.

На сьогоднішній день однією з основних проблем залишається підвищене енергоспоживання в режимі UMTS у порівнянні з режимом GSM.

Ще одним представником стандартів стільникового зв'язку третього покоління (3G) є стандарт CDMA2000. У CDMA (Code Division Multiple Access) для кожного вузла виділяється весь спектр частот і весь час. Стандарт CDMA2000 використовує для роботи частотний діапазон, розділений на аналогічні смуги частот 1,25 МГц.

Ми сконцентруємося на CDMA2000 1X EV-DO, оскільки він в першу чергу призначений для забезпечення широкосмугового доступу до інтернету.

1X EV-DO - це фаза розвитку стандарту мобільного зв'язку CDMA2000 1x. EV-DO - скорочення від EVolution Data Only. На відміну від EV-DV (EVolution Data / Voice) еволюції зазнав тільки інтерфейс передачі даних, а передача голосу залишилася повністю ідентичною CDMA2000 1x і CDMA One (IS-95a / b) [26]. EV-DO, що одержав маркування Rev. C, об'єднує в собі такі

мобільні технології як CDMA, TDM, OFDM [30], MIMO і Space Division Multiple Access (SDMA).

Після того, як почали говорити про теоретично можливі швидкості в UMTS і CDMA2000, почали посилено просувати ідею 4G, в яку і повинні були увійти нові стандарти [24].

На даний момент сімейство 4G складається з двох стандартів - WiMAX і LTE [25,28]. Почнемо розгляд 4G з LTE. LTE (Long-Term Evolution) є оновленням як для операторів з мережею GSM/UMTS, так і для операторів з мережею CDMA2000. У різних країнах використовуються різні частоти і смуги для LTE, що робить можливим підключати до LTE мереж по всьому світу тільки багатодіапазонні телефони. Метою його створення було:

- збільшення можливостей високошвидкісних систем мобільного зв'язку;
- зменшення вартості передачі даних;
- можливість надання широкого спектра недорогих послуг.

WiMAX - відноситься до мереж класу MAN (Metropolitan Area Network) [17]. Технологія працює в діапазоні частот 2-6 ГГц. Найбільш зручні для забезпечення мобільності частоти 2,3-2,7 ГГц, але отримати дозвіл на них вкрай складно. Наступний використовуваний в обладнанні діапазон: 3.4-3.6 ГГц - золота середина. На частотах близьких до 6 ГГц працює, так званий, preWiMAX, абонентські пристрої повинні знаходитися в області прямої видимості базової станції, оскільки проникнення хвиль такої частоти і огинання перешкод дуже слабке. У цьому плані тим же GSM-мереж (800-1900 МГц), а тим більше CDMA (450 МГц) набагато простіше.

Насправді стандарти LTE і WiMAX досить близькі між собою [5]. Вони обидва використовують технологію кодування OFDM і систему передачі даних MIMO. І в тому, і в іншому стандарті застосовуються FDD і TDD-дуплексування при пропускній спроможності каналу до 20 МГц. І обидві з систем зв'язку використовують в ролі свого протоколу IP. Відповідно, обидві технології в реальності однаково добре застосовують свій частотний діапазон і за-

безпечують порівнянню швидкість передачі даних інтернет-доступу. Але, звичайно, є у них і деякі відмінності. Одним з таких відмінностей є набагато простіша інфраструктура мережі WiMAX, а, отже, і більш надійна технічно. Дана простота стандарту забезпечується його призначенням виключно для передачі даних. З іншого боку, «складності» LTE потрібні для забезпечення її сумісності зі стандартами попередніх поколінь - GSM і 3G.

Четверте покоління мобільного зв'язку [6] - новий виток епохи інтернет. Вперше безпроводовий інтернет може конкурувати з оптоволоконними мережами, перевершуючи їх у швидкості та доступності. Адже набагато простіше встановити одну базову станцію LTE, ніж плести павутину з кабелів. 4G - стандарт, який вийде за рамки смартфонів і швидше за все замінить провідний інтернет взагалі. А після еволюціонує в 5G

У тому випадку, наприклад задачі «останньої милі», коли рішення засновані на провідній інфраструктурі малоефективні, вдаються до використання безпроводових технологій. В якості аргументів на користь безпроводових рішень при виборі способу побудови мережі можна виділити[8] :

- Гнучкість конфігурації. Всі безпроводові мережі підтримують як режим інфраструктури (підключення через точку доступу), так і режим «рівний з рівним» (без застосування точки доступу). Можна додавати нових користувачів і встановлювати нові вузли мережі в будь-якому місці. Безпроводові мережі можуть бути застосовані для тимчасового використання в приміщеннях, де немає встановленої кабельної мережі, або якщо прокладка мережевих кабелів ускладнена.

- Простота рішення мережі. Безпроводові робочі станції можуть додаватися без погіршення продуктивності мережі. Перевантаження мережі трафіком можна легко уникнути додаванням точки доступу для скорочення часу відгуку мережі.

- Безпека. Безпроводові мережі стандартів 802.11 забезпечують необхідну безпеку, використовуючи протокол забезпечення безпеки безпроводових мереж, стандарт безпеки безпроводових локальних мереж (Wi-Fi Protected

Access, WPA) і т.д. Механізм шифрування даних ґрунтується на алгоритмі загального ключа.

- Підтримка роумінгу. Завдяки підтримці роумінгу між точками доступу, користувачі можуть продовжувати працювати з ресурсами мережі навіть під час переміщення.

- Величезний вибір пристроїв. Існують кілька основних видів пристроїв: точки доступу, каналоутворювального обладнання, антени. Клієнт підключається до комп'ютера по одному із стандартних інтерфейсів. Один з одним клієнти можуть працювати в режимі «рівний з рівним» безпосередньо, без використання додаткових пристроїв, утворюючи аналог тимчасової провідної мережі. Якщо потрібно структурована безпроводова мережа, використовуються точки доступу, що налічують безліч різновидів. Ці пристрої дозволяють взаємодіяти безпроводовим пристроїв з існуючою локальною мережею, а також забезпечують можливість виходу в інші види мереж, наприклад, Інтернет.

Всі вищевказані переваги безпроводових мереж визначили їх популярність і стрімкий розвиток як в комерційній сфері, так і для домашнього користування.

Крім тенденції поширення безпроводових мереж і заміна ними дротових, існують також інші:

- збільшення зони дії кожної безпроводової мережі;
- збільшення швидкостей передачі даних;
- зменшення споживаної потужності;
- покращення безпеки передачі даних.

1.3. Стандарти IEEE 802.11 та їх місце в безпроводових системах передавання інформації

Зазвичай WiFi мережі використовуються для продовження дротяних корпоративних локальних мереж. У невеликих компаніях WLAN можуть повністю замінити дротяні з'єднання.

Основний стандарт для WLAN - 802.11. Стандарт був розроблений Інститутом інженерів електротехніки и електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE). Він визначає порядок організації безпроводових мереж на рівні управління доступом до середовища (MAC-рівні) і фізичному (PHY) рівні [9].

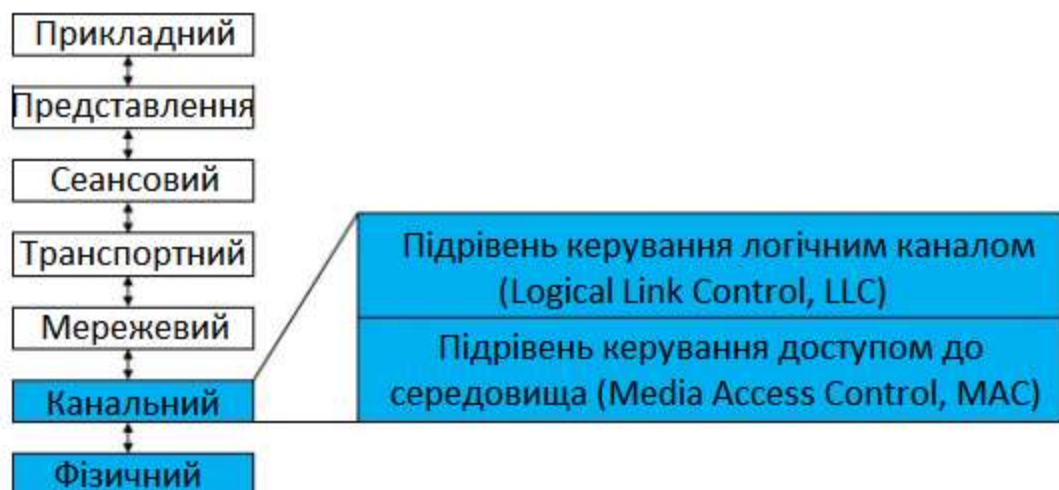


Рисунок 1.1 Місце стандарту 802.11n в моделі OSI

Подібно до провідного Ethernet, IEEE 802.11 визначає протокол використання єдиного середовища передачі, що отримав назву множинний доступ із контролем несучої та уникненням колізій (carrier sense multiple access collision avoidance - CSMA/CA) [10]. Імовірність колізій безпроводових вузлів мінімізується шляхом попередньої посилки короткого повідомлення, званого ready to send (RTS), воно інформує інші вузли про тривалість майбутньої передачі і адресата. Це дозволяє іншим вузлам затримати передачу на час, рівне оголошеної тривалості повідомлення. Приймальна станція повинна відповісти на

RTS посилкою clear to send (CTS). Це дозволяє передавальному вузлу дізнатися, чи вільна середовище та чи готовий приймальний вузол до прийому. Після отримання пакету даних приймальний вузол повинен передати підтвердження (ACK) факту безпомилкового прийому. Якщо ACK не отримано, спроба передачі пакету даних буде повторена.

У стандарті передбачено забезпечення безпеки даних, яке включає аутентифікацію для перевірки того, що вузол, що входить в мережу, авторизований в ній, а також шифрування для захисту від підслуховування.

В основу стандарту 802.11 покладена стільникова архітектура. Мережа може складатися з однієї або декількох осередків (сот). Кожна сота управляється базовою станцією, званою точкою доступу (Access Point, AP). Точка доступу і робочі станції, що знаходяться в межах радіусу її дії, утворюють базову зону обслуговування (Basic Service Set, BSS). Точки доступу багатосотової мережі взаємодіють між собою через розподільну систему (Distribution System, DS), що є еквівалентом магістрального сегменту кабельних ЛЗ. Вся інфраструктура, що включає точки доступу і розподільну систему, утворює розширену зону обслуговування (Extended Service Set). У стандарті передбачений також односотовий варіант безпроводової мережі, який може бути реалізований і без точки доступу, при цьому частина її функцій виконується безпосередньо робочими станціями.

Фізичний рівень, або PHY, є середовищем, за допомогою якої здійснюється зв'язок. Саме на цьому рівні передавач управляється для доступу до середовища. Ми в першу чергу пов'язані з бездротовою середовищем. На відміну від обмеженого, провідного середовища, WLANs працюють "по повітрю" і мають зовсім інший набір правил для доступу і управління середовищем. Наприклад, провідні мережі мають можливість виявляти і пом'якшувати конфлікти даних; Бездротові мережі не можуть виявити зіткнення, натомість, використовуються складні протоколи, щоб відкрити доступ і контроль середовища і, щоб уникнути зіткнень. Бездротові мережі також схильні до ненавмисних переш-

код і навмисних збоїв. Провідні мережі досить важко зламати в той час як бездротові мережі можуть бути випадково зламані будь-ким з бездротовою картою в діапазоні від точки доступу. Ці питання надали розробникам значні труднощі, які треба подолати, щоб гарантувати, що WLANs надійні і безпечні.

Канальний рівень складається з двох підрівнів: логічний Link Control (LLC) підрівень і управління доступом до середовища (MAC) підрівня. LLC приймає пакет IP від мережевого рівня над ним і інкапсулює дані з адресації і управління інформацією. Цей пакет, який тепер називається кадр, передається на MAC, який модифікує адресацію і керуючу інформацію в заголовку кадру, щоб забезпечити дані в належній формі для перенесення на фізичний рівень. MAC потім передає кадр до PHY, який модулює дані відповідно до стандарту PHY у використанні (DSSS, OFDM), і передає біти. Зворотний процес відбувається на приймальному кінці.

Після успішного прийому переданих даних, його демодулюється і результуючий кадр передається приймає MAC. Заголовок кадру перевіряється, щоб визначити, чи є це передбачуваний адресат; якщо це так, то дані MAC видаляють і передається LLC, який потім розглядає адреси верхнього рівня в заголовку. Він відкидає свої дані і передає пакет в мережевий рівень, який виконує правильну маршрутизацію до місця призначення в локальній мережі.

1.4. Вибір і обґрунтування критеріїв інформаційної ефективності для безпроводових засобів зв'язку

Узагальненою характеристикою ефективності систем зв'язку є коефіцієнт використання каналу по пропускній здатності (інформаційна ефективність) який характеризує реальну швидкість передачі інформації по відношенню до пропускної спроможності каналу зв'язку [11,14]:

$$\eta = \frac{R_d}{C_n}, \quad (1.1)$$

де R_d – продуктивність дискретного каналу, C_n – пропускна здатність неперервного каналу [13]. Інформаційна ефективність η завжди менше одиниці; чим ближче до одиниці, тим досконаліше система. Інформаційна ефективність фактично показує, наскільки повно використовується наявна в розпорядженні пропускна здатність безперервного каналу.

Метою є досягнення найкращої інформаційної ефективності бездротових систем передачі на основі перерозподілу ресурсів каналів зв'язку.

У даній роботі критерій максимуму інформаційної ефективності η обраний у зв'язку з тим, що якість роботи бездротової системи передачі можна оцінити за такими параметрами, як кількість інформації, переданої в одиницю часу, і достовірність, з якою ця інформація передається. При цьому обов'язковою умовою є забезпечення необхідної достовірності інформації, що передається, поряд з прагненням досягти максимальної продуктивності джерела повідомлень при деяких виділених ресурсах системи передачі і доступної пропускної здатності каналу передачі [16].

В критерій максимуму інформаційної ефективності закладені кількісні та якісні параметри, на підставі яких можна робити висновок про якість роботи системи.

Відповідно до методики Зюко А. Г. [12], використовуються наступні показники ефективності використання ресурсів каналу зв'язку:

- Показник частотної ефективності бездротової системи передачі, або

коефіцієнт використання смуги частот каналу, який визначається наступним чином:

$$\gamma = \frac{R_o}{\Delta F}, \quad (1.2)$$

де R_o – продуктивність, ΔF – полоса використовуваних частот. Таким чином, γ показує ефективність використання продуктивності по відношенню до частотним і тимчасовим ресурсів системи передачі;

– Показник енергетичної ефективності бездротової системи передачі, або коефіцієнт використання потужності сигналу, визначається наступним виразом:

$$\beta = \frac{R_o}{\alpha} = \frac{R_o}{P_{\text{прм}} / N_0}, \quad (1.3)$$

де R_o – продуктивність, N_0 – спектральна щільність потужності білого шуму, $P_{\text{прм}}$ – потужність сигналу в точці прийому. Таким чином, β показує ефективність використання продуктивності по відношенню до енергетичних ресурсів системи передачі. Показник енергетичної ефективності β є найважливішим показником систем передачі, де потужність передавача строго обмежена (наприклад, системи супутникового зв'язку та ін.).

Граничні можливості системи передачі інформації можна оцінити за допомогою формули для пропускної здатності [21] гауссовського безперервного каналу зв'язку з смугою частот ΔF :

$$C = \Delta F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) \quad (1.4)$$

Тут $P_c = E_b B$ – середня потужність сигналу: E_b – енергія, яка витрачається на передачу одного біту інформації; $B = 1/T_b$ – швидкість передачі інформації джерела; T_b – час передачі джерелом одного біту інформації; $P_{\text{ш}} = N_0 \Delta F$ – середня потужність шуму в полосі частот.

В реальних засобах електрозв'язку швидкість передачі інформації B [Біт/с], менше пропускної здатності безперервного каналу: $B \leq C$. Можна показати, що після елементарних перетворень ця нерівність приводиться до вигляду:

$$\beta \leq \frac{\gamma}{2^\gamma - 1}, \quad (1.5)$$

$$\text{де } \beta = \frac{1}{h^2} = \frac{N_0}{E_b}. \quad (1.6)$$

Тоді інформаційна ефективність для гауссовського безперервного каналу може бути знайдена за формулою:

$$\eta = \frac{\gamma}{\log_2 \left(\frac{\gamma}{\beta} + 1 \right)}, \quad (1.7)$$

тим самим представляючи собою узагальнений показник ефективності бездротової системи передачі.

Висновки до розділу 1

Таким чином, в даному розділі було обґрунтовано доцільність дослідження інформаційної ефективності безпроводових засобів зв'язку в цілому і безпосередньо на основі стандартів 802.11. Були розглянуті характеристики безпроводових мереж, що надають їм перевагу над провідними, серед яких найголовнішою є можливість швидкої інсталяції мережі без витрат на провідну структуру.

Також, в першому розділі було вибрано і обґрунтовано критерій інформаційної ефективності для безпроводових засобів зв'язку. Таким є коефіцієнт використання каналу по пропускній здатності (інформаційна ефективність) який характеризує реальну швидкість передачі інформації по відношенню до пропускної спроможності каналу зв'язку η . Також цей коефіцієнт може виражатися через два показники: частотної ефективності бездротової системи передачі, або коефіцієнт використання смуги частот каналу та показник енергетичної ефективності бездротової системи передачі, або коефіцієнт використання потужності сигналу.

Наступним кроком згідно задач дослідження потрібно розглянути вказані характеристики та параметри у стандартах 802.11n/ac, а також вибрати засоби безпроводового зв'язку для практичного дослідження, що і буде проведено у розділі 2 даної роботи.

РОЗДІЛ 2. Стандарти IEEE 802.11 та їх характеристики

2.1 Види стандартів IEEE 802.11 та їх розвиток

Повний список включає себе більше 20 стандартів, але найбільш часто використовуваними є наступні [18]:

- 802.11b - підтримує передачу даних зі швидкостями до 11 Мбіт / с по радіоканалу в діапазоні близько 2,4 ГГц (1999).

- 802.11a - високошвидкісний стандарт WLAN. Підтримує передачу даних зі швидкостями до 54 Мбіт / с по радіоканалу в діапазоні близько 5 ГГц. (1999, вихід продуктів в 2001).

- 802.11g - призначений, для забезпечення швидкостей передачі даних до 54 Мбіт / с по радіоканалу в діапазоні близько 2,4 ГГц (2003).

- 802.11n - використовуються частотні канали в частотних діапазонах WiFi 2.4GHz і 5GHz. Сумісний з 11b / 11a / 11g. Теоретично 802.11n здатний забезпечити швидкість передачі даних до 300 Мбіт / с.

- 802.11ac - працює в діапазоні частот 5 ГГц. Стандарт дозволяє істотно розширити пропускну здатність мережі, починаючи від 433 Мбіт / с (пристрої з 433 Мбіт / с на канал уже були доступні влітку 2014 роки) і до 6,77 Гбіт / с при 8x MU-MIMO-антенах.

Перейдемо до порівняння вищевказаних стандартів. У таблиці 2.1 показано, що стандарти різняться між собою максимальною швидкістю передачі, частотним діапазоном та радіочастотною технологією.

Таблиця 2.1 Порівняльні характеристики стандартів 802.11

Рік за- прова- дження	Стандарт	Час- тота, ГГц	Ширина смуги, МГц	Радіочас- тотна тех-ноло- гія	Макси-ма- льна шви- дкість, Мбіт/с	Види мо- дуляції
1999	802.11b	2.4	20	DSSS	11	DBPSK, DQPSK
1999	802.11a	5	20	OFDM	54	BPSK, QPSK, 16- QAM, 64- QAM
2003	802.11g	2.4	20	DSSS, OFDM	54	BPSK, QPSK, 16- QAM, 64- QAM
2009	802.11n	2.4 / 5	20 / 40	OFDM	600	BPSK, QPSK, 16- QAM, 64- QAM
2013	802.11ac	5	20 / 40/80/160	OFDM	6770	256-QAM

1.5. Характеристики і параметри стандартів IEEE 802.11, що використовуються для оцінки інформаційної ефективності засобів безпроводового зв'язку

Важливою властивістю усіх стандартів є те, що вони працюють в частотних діапазонах, що не потребують ліцензування. В таблиці 2.2 показані канали Wi-Fi в діапазоні 2.4 ГГц [19].

Таблиця 2.2 Частотні смуги і канали Wi-Fi в 2.4 ГГц

Канал	Нижня частота	Центральна частота	Верхня частота
1	2.401	2.412	2.423
2	2.406	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.446	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473
12	2.456	2.467	2.478
13	2.461	2.472	2.483

В даній смузі частот доступні 3 канали, які не перекривають один одного: 1, 6, 11 (рис.2.1). Дане виділення будується на вимозі IEEE щодо забезпечення мінімуму в 25 МГц для рознесення центрів частотних каналів Wi-Fi, які не перекриваються (рис 2.2). При цьому ширина каналу становить 22MHz.

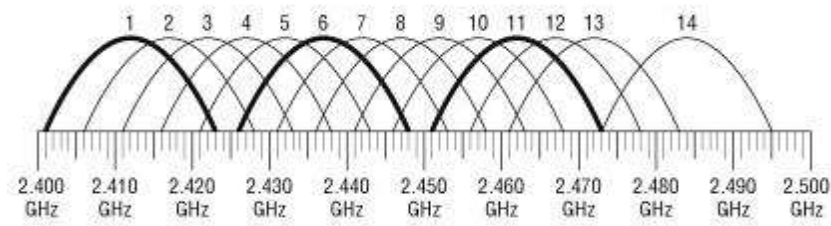


Рисунок. 2.1 Загальна діаграма перекриття частотних каналів Wi-Fi в 2.4 ГГц

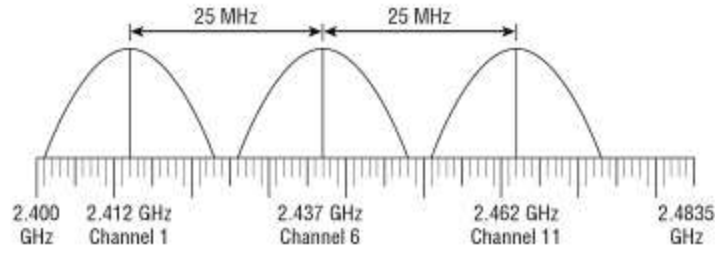


Рисунок 2.2 Рознесення каналів, що не перекриваються

В таблиці 2.3 представлені канали в діапазоні 5 ГГц:

Таблиця 2.3 Канали Wi-Fi в 5 ГГц

Канал	Центральна частота	Канал	Центральна частота
34	5,17	124	5,62
36	5,18	128	5,64
38	5,19	132	5,66
40	5,2	136	5,68
42	5,21	140	5,7
44	5,22	147	5,735
46	5,23	149	5,745
48	5,24	151	5,755
50	5,25	152	5,76
52	5,26	153	5,765
54	5,27	155	5,775
56	5,28	157	5,785

Продовження таблиці 2.3

58	5,29	159	5,795
60	5,3	160	5,8
62	5,31	161	5,805
64	5,32	163	5,815
100	5,5	165	5,825
104	5,52	167	5,835
108	5,54	171	5,855
112	5,56	173	5,865
116	5,58	177	5,885
120	5,6	180	5,905

Для обчислення середньої частоти каналу WiFi можна використовувати формулу :

$$5000+(5*N) \text{ МГц,}$$

де N - номер каналу Wi-Fi.

Говорячи про енергетику, то згідно з рішенням №18 від 12.01.2012 «Про схвалення узагальнених умов застосування радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв», додатки 9-10, можна представити інформацію для різних діапазонів частот у вигляді таблиць 2.4 – 2.7:

Таблиця 2.4 . Узагальнені умови застосування в смугах радіочастот 2400-2483,5 МГц:

Найменування параметру	Опис	Примітка
Служба радіозв'язку	ФІКСОВАНА	Радіозв'язок у системі передавання даних з використанням шумоподібних сигналів
Сітка (центральних) частот	5 МГц	<p>Формула утворення сітки центральних частот каналів:</p> $f_n = 2412 + 5 \cdot (n - 1), \text{ де } n = 1, 2, \dots, 13.$ <p>Центральні частоти каналів: 2412 МГц, 2417 МГц, 2422 МГц, 2427 МГц, 2432 МГц, 2437 МГц, 2442 МГц, 2447 МГц, 2452 МГц, 2457 МГц, 2462 МГц, 2467 МГц, 2472 МГц</p>
Максимальна потужність передавача (передавачів)	<p>100 мВт</p> $E_{\text{ІВП}} \leq 100 \text{ мВт}$ <p>(для використання на бездозвільній основі)</p>	<p>Максимальне середнє значення спектральної щільності ЕІВП до 5 мВт/МГц.</p> <p>При використанні режиму роботи з багатоелементними антенними системами (технологія МІМО) з двома та більше просторовими каналами передачі, сумарна ЕІВП усіх передавачів, які формують різні просторові канали передачі і використовуються у відповідній схемі технології МІМО, не повинна перевищувати вказаних припустимих значень ЕІВП та спектральної щільності ЕІВП</p>

Таблиця 2.5 . Узагальнені умови застосування в смугах радіочастот 5150-5350 МГц:

Найменування параметру	Опис	Примітка
Служба радіозв'язку	РУХОМА, за винятком повітряної рухомої	Радіозв'язок у багатоканальних розподільчих системах для передавання та ретрансляції телевізійного зображення, передавання звуку, цифрової інформації
Сітка (центральних) частот	5 МГц	Формула утворення сітки центральних частот каналів: $f_n = 5000 + 5 \cdot n$, де 1) для ширини каналу 20 МГц $n = 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64$; Центральні частоти каналів: 5180 МГц, 5200 МГц, 5220 МГц, 5240 МГц, 5260 МГц, 5280 МГц, 5300 МГц, 5320 МГц; 2) для ширини каналу 40 МГц $n = 38, 46, 56, 64$; Центральні частоти каналів: 5190 МГц, 5230 МГц, 5280 МГц, 5320 МГц
Максимальна потужність передавача (передавачів)	$E_{\text{ВП}} \leq 200$ мВт $E_{\text{ВП}} \leq 100$ мВт (для використання на бездозвільній основі)	У смузі радіочастот 5150-5350 МГц максимальне значення спектральної щільності ЕВП не повинне перевищувати 10 мВт/МГц у будь-якій смузі шириною 1 МГц. При використанні режиму роботи МІМО з двома та більше просторовими каналами передачі, сумарна ЕВП усіх передавачів, які формують різні просторові канали передачі і використовуються у відповідній схемі технології МІМО, не повинна перевищувати вказаних припустимих значень ЕВП та спектральної щільності ЕВП.

Таблиця 2.6 . Узагальнені умови застосування в смугах радіочастот 5470-5670 МГц:

Найменування параметру	Опис	Примітка
Служба радіозв'язку	РУХОМА, за винятком повітряної рухомої	Радіозв'язок у багатоканальних розподільчих системах для передавання та ретрансляції ТВ зображення, передавання звуку, цифр. інформації
Сітка (центральних) частот	5 МГц	Формула утворення сітки центральних частот каналів: $f_n = 5000 + 5 \cdot n$, де 3) для ширини каналу 20 МГц $n=100, 104, 108, 112, 116, 120, 124, 128, 132, 136$; Центральні частоти каналів: 5500 МГц, 5520 МГц, 5540 МГц, 5560 МГц, 5580 МГц, 5600 МГц, 5620 МГц, 5640 МГц, 5660 МГц, 5680 МГц; для ширини каналу 40 МГц $n=98, 106, 114, 122, 130$; Центральні частоти каналів: 5490 МГц, 5530 МГц, 5610 МГц, 5650 МГц
Максимальна потужність передавача (передавачів)	250 мВт та $E_{\text{ІВП}} \leq 1 \text{ Вт}$ $E_{\text{ІВП}} \leq 100 \text{ мВт}$ (для використання на бездозвільній основі)	При застосуванні поза межами (зовні) будівель. Максимальне значення спектральної щільності ЕІВП не повинне перевищувати 50 мВт/МГц у будь-якій смузі шириною 1 МГц. При використанні режиму роботи МІМО з двома та більше просторовими каналами передачі, сумарна ЕІВП усіх передавачів, які формують різні просторові канали передачі і використовуються у відповідній схемі технології МІМО, не повинна перевищувати вказаних припустимих значень ЕІВП та спектральної щільності ЕІВП

Таблиця 2.7 . Узагальнені умови застосування в смугах радіочастот 5725-5850 МГц:

Найменування параметру	Опис	Примітка
Служба радіозв'язку	РУХОМА, за винятком повітряної рухомої	Радіозв'язок у багатоканальних розподільчих системах для передавання та ретрансляції телевізійного зображення, передавання звуку, цифрової інформації
Сітка (центральних) частот	5 МГц	Формула утворення сітки центральних частот каналів: $f_n = 5000 + 5 \cdot n$, де для ширини каналу 20 МГц $n = 148, 152, 156, 160, 164, 168$; Центральні частоти каналів: 5740 МГц, 5760 МГц, 5780 МГц, 5800 МГц, 5820 МГц, 5840 МГц; 2) для ширини каналу 40 МГц $n = 156, 162$; Центральні частоти каналів: 5780 МГц, 5810 МГц
Максимальна потужність передавача (передавачів)	250 мВт та $E_{\text{ВП}} \leq 2 \text{ Вт}$ $E_{\text{ВП}} \leq 100 \text{ мВт}$ (для використання на бездозвільній основі)	При застосуванні всередині будівель. Максимальне значення спектральної щільності ЕВП не повинне перевищувати 50 мВт/МГц у будь-якій смузі шириною 1 МГц. При використанні режиму роботи з багатoelementними антенними системами (технологія МІМО) з двома та більше просторовими каналами передачі, сумарна ЕВП усіх передавачів, які формують різні просторові канали передачі і використовуються у відповідній схемі технології МІМО, не повинна перевищувати вказаних припустимих значень ЕВП та спектральної щільності ЕВП

Стандарт 802.11n [22] визначає Індекс модуляції і схеми кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). MCS - просте ціле число, що привласнюється кожному варіанту модуляції (всього можливо 77 варіантів). Кожен варіант визначає тип модуляції радіочастоти (Type), швидкість кодування (Coding Rate), захисний інтервал (Short Guard Interval) і значення швидкості передачі даних. Поєднання всіх цих факторів визначає реальну фізичну (PHY) або каналну швидкість передачі даних, починаючи від 6,5 Мбіт / с до 600 Мбіт / с (дана швидкість може бути досягнута за рахунок використання всіх можливих опцій стандарту 802.11n). Деякі значення індексу MCS визначені і показані в наступній табл. 2.8:

Таблиця 2.8 Сигнально-кодові конструкції стандарту 802.11n

MCS Index	Type	Coding Rate	Spatial Streams	Data Rate (Mbps) with 20 MHz CH		Data Rate (Mbps) with 40 MHz CH	
				800 ns	400 ns (SGI)	800 ns	400 ns (SGI)
0	BPSK	1 / 2	1	6.50	7.20	13.50	15.00
1	QPSK	1 / 2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
2	QPSK	3 / 4	1	19.50	21.70	40.50	45.00
3	16-QAM	1 / 2	1	26.00	28.90	54.00	60.00
4	16-QAM	3 / 4	1	39.00	43.30	81.00	90.00
5	64-QAM	2 / 3	1	52.00	57.80	108.00	120.00
6	64-QAM	3 / 4	1	58.50	65.00	121.50	135.00
7	64-QAM	5 / 6	1	65.00	72.20	135.00	150.00
8	BPSK	1 / 2	2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	QPSK	1 / 2	2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	QPSK	3 / 4	2	39.00	43.30	81.00	90.00
11	16-QAM	1 / 2	2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	16-QAM	3 / 4	2	78.00	86.70	162.00	180.00
13	64-QAM	2 / 3	2	104.00	115.60	216.00	240.00
14	64-QAM	3 / 4	2	117.00	130.00	243.00	270.00
15	64-QAM	5 / 6	2	130.00	144.40	270.00	300.00
16	BPSK	1 / 2	3	19.50	21.70	40.50	45.00
...
31	64-QAM	5 / 6	4	260.00	288.90	540.00	600.00

У стандарті 802.11ac [27] порівняно з попередніми версіями з'явилося більше швидкостей підключення, схем модуляції і кодування (MCS). Для спро-

щення вирішено було зробити всього 10 схем-індексів (0-9) з різницею в кількості просторових потоків. Нижче таблиця 2.9 MCS для одного просторового потоку в рамках 802.11n і 802.11ac [30].

Таблиця 2.9 Сигнально-кодові конструкції стандарту 802.11ac

802.11n											802.11ac
HT MCS Index	Spatial Streams	Modulation & Coding	Data Rate (GI = 800ns)	Data Rate (GI = 400ns)	Data Rate (GI = 800ns)	Data Rate (GI = 400ns)	Data Rate (GI = 800ns)	Data Rate (GI = 400ns)	Data Rate (GI = 800ns)	Data Rate (GI = 400ns)	VHT MCS Index
			20MHz	20MHz	40MHz	40MHz	80MHz	80MHz	160MHz	160MHz	
0	1	BPSK 1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65	0
1	1	QPSK 1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130	1
2	1	QPSK 3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195	2
3	1	16-QAM 1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260	3
4	1	16-QAM 3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390	4
5	1	64-QAM 2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520	5
6	1	64-QAM 3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585	6
7	1	64-QAM 5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650	7
	1	256-QAM 3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780	8
	1	256-QAM 5/6	n/a	n/a	180	200	390	433.3	780	866.7	9

Треба звернути увагу, що деякі швидкості в 802.11ac не підтримуються (n / a). Це пов'язано з розподілом інформації по піднесучих: для деяких схем можна отримати цілу кількість блоків, залишаються зайві біти. Вирішено не заповнювати їх, а просто не використовувати, тому що таких швидкостей не багато. Модуляція 256-QAM дозволяє збільшити швидкість на 33% (кількість біт на кожну поднесущую збільшилася з 6 до 8).

2.3 Вибір засобів безпроводового зв'язку для дослідження інформаційної ефективності та їх характеристики

Технології безпроводового зв'язку сьогодні переживають справжній бум розвитку. В основному це пов'язано з смартфонами, планшетами і мобільними комп'ютерами, які відіграють велику роль у нашому житті. Крім того, в різних галузях промисловості, сільському господарстві, у військовій сфері назріває необхідність в організації надійних систем управління розподіленими об'єктами і об'єднання їх в глобальну мережу. Подібні тенденції спостерігаються в усьому світі і ведуть до неминучого розвитку безпроводових технологій зв'язку.

На сьогоднішній день телекомунікаційний ринок представлений багатством вендорами, продукція яких відрізняється між собою ціновою політикою, апаратним виконанням, характеристиками та доступним функціоналом. Серед найбільш відомих та популярних виробників засобів безпроводового зв'язку можна виділити наступні: Cisco, Mikrotik, TP-Link, Ubiquiti та інші. Проте, для виконання досліджень у даній роботі, нам необхідно було обрати продукт, який би відповідав наступним критеріям:

- середня вартість безпроводових засобів зв'язку;
- підтримка стандартів IEEE 802.11;
- можливість спостереження за детальними характеристиками сигналів, що передаються;
- гнучке налаштування параметрів передачі сигналів.

У зв'язку з цим, було обрано Mikrotik NetMetal 5 (RB921UAGS-5SHPasT-NM) – це точка доступу для застосування в особливо складних кліматичних умовах. Захищений металевим корпусом, працює в гігабітному стандарті ac, а також, на відміну від другої моделі в серії з 922-ї платою, - оснащена 3-ма антенними виходами [31].

Основні характеристики:

- 1,4 Гбіт / с пропускна здатність по стандарту 802.11ac;
- водонепроникний алюмінієвий корпус;
- 3 RP-SMA роз'єму для підключення антен (3x3 MIMO);
- Гігабітний Ethernet-порт, 1 SFP порт, 1 USB 2.0 порт.



Рисунок.2.3 Mikrotik NetMetal 5 (RB921UAGS-5SHPasT-NM)

Апаратні та програмні можливості моделі RB921UAGS-5SHPasT, для цієї цінової категорії, дуже значні, і перевершують не тільки інші аналогічні пристрої модельного ряду Mikrotik, а й центральної частини конкурентів: Потужність передавача становить 33dBm - 2000mW (охолодження пасивне, проте металевий корпус має куди краще теплопровідність, ніж пластиковий); AP працює в діапазоні 4920-6100 MHz (ширина каналу до 80MHz); 3 антенних виходу RP-SMA і підтримка MIMO 3x3, що в стандарті 802.11ac, при трьох каналах передачі шириною 80MHz і модуляції 256QAM теоретично дозволяє досягти

швидкості передачі до 1.4Гбіт / с; Є 1х LAN-порт 10/100/1000 і слот для установки SFP-модуля для оптики; Також є USB 2.0, а прошивка "з коробки" працює з 3G-модемами і знімними носіями (засобами ОС можна реалізувати підтримку будь-якого обладнання); MIPS-BE CPU 720 MHz, 64MB NAND-flash і 128 MB SDRAM дозволять уникнути різних лагів при обробці великих обсягів трафіку і безлічі (більше 100) одночасних підключень при роботі в якості HotSpot.

Корпус NetMetal 5 виконаний з алюмінію. Кришки доступу до портів закриваються засувками, а самі порти захищені від вологи і статички. У комплект входить металевий кронштейн і хомут для кріплення на щоглу. Пристрій працює через живлення по LAN-порту, проте в комплект також входить PoE інжектор і БП 24V 1.2A на той випадок, якщо по Ethernet-кабелю не подається необхідна напруга (в будь-якому випадку рекомендується жити через інжектор). RB921UAGS-5SHPasT працює під управлінням RouterOS 4L, по функціоналу порівнянної не стільки з ОС бюджетних мережевих пристроїв, скільки з IOS або BSD, (нехай і з деякими обмеженнями), і включає все необхідне для налаштування будь-якого мережевого сценарію.

Висновки до розділу 2

В даному розділі були розглянуті стандарти IEEE 802.11 та історія їх розвитку. Були розглянуті характеристики і параметри вказаних стандартів, а саме використовувані частоти та допустимі значення енергетики, що використовуються для оцінки інформаційної ефективності, порівняно їх між собою та виділено особливості кожного з них.

Також в розділі 2 було проаналізовано сучасний ринок засобів безпроводового зв'язку, оглянуто наявних на сьогоднішній день вендорів та перелічено характеристики, якими вони відрізняються. Таким чином, в якості обладнання, що буде використовуватися в практичному дослідженні було обрано MikroTik RouterBoard Groove A-52HPn – безпроводна точка доступу, що працює в безпроводних стандартах 802.11 a/b/g/n із канальною швидкістю до 150 Мбіт/с. Дана точка доступу відповідає критеріям пошуку, що нами ставилися, а саме: середня вартість безпроводових засобів зв'язку; підтримка стандартів IEEE 802.11; можливість спостереження за детальними характеристиками сигналів, що передаються; гнучке налаштування параметрів передачі сигналів.

Наступним кроком дослідження по темі роботи є практична оцінка інформаційної ефективності в мережах 802.11n за допомогою імітаційної моделі, результати якого представлені в розділі 3.

РОЗДІЛ 3. Теоретичне дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11

3.1 Розробка імітаційної моделі оцінки інформаційної ефективності засобів зв'язку в середовищі MatLab

Імітаційне моделювання - це метод дослідження, при якому система, що вивчається замінюється моделлю, з достатньою точністю описує реальну систему і з якою проводяться експерименти з метою отримання інформації про властивості цієї системи. Одним з основних видів імітаційного моделювання є статистичне імітаційне моделювання [32].

Імітаційне статистичне моделювання являє собою чисельний метод проведення на ЕОМ обчислювальних експериментів з математичними моделями, що імітують поведінку реальних об'єктів, процесів і систем в часі протягом заданого періоду.

До переваг імітаційного моделювання можна віднести:

- Висока адекватність між фізичною суттю описуваного процесу і його моделлю.
- Можливість описати складну систему на досить високому рівні деталізації
- Значно більше областей дослідження, ніж аналітичне моделювання.
- Відсутність обмежень на відображення в моделі залежностей між параметрами моделі.
- Отримання великого числа даних про досліджуваний об'єкт (функцію розподілу випадкової величини багато іншого).
- Доступність і розвиненість інструментів моделювання.

До недоліків імітаційного моделювання відносять:

- Розробка хорошою ІМ вимагає багато часу на створення і налагодження.

- Відносно високі вимоги до кваліфікації дослідника для моделі.
- Низька відтворюваність - спільність застосування і індивідуальність реалізації.

Для теоретичного дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11 була розроблена імітаційна модель [33] в програмному забезпеченні MATLAB. Код програми наведений у Додатку А.

Вхідними параметрами у нашій моделі для дослідження були:

- вид модуляції, який варіювався від BPSK до QAM-256, залежно від індексу модуляції m ;
- швидкість завадостійкого кодування: $r_k = 1/2, 2/3, 3/4$ чи $5/6$, залежно від типу сигнально-кодової конструкції;
- коефіцієнт надлишковості стеку протоколів TCP/IP, який мінімально дорівнює $tcp_{red} = 13 \%$;
- ширина частотного каналу: $\Delta F = 20$ МГц;
- спектральна густина потужності шуму $N_0 = -100$ dBm;
- потужність випромінювання передавача: $P_t = 33$ dBm;
- коефіцієнти підсилення передаючої та приймальної антен: $G_t = G_r = 16$ dB;

Значення інформаційної ефективності обраховували як відношення продуктивності до пропускної здатності каналу: $\eta = \frac{R}{C}$. Значення продуктивності обчислили як:

$$R = V_s * (1 + p_{\text{пом}} * \log_2 p_{\text{пом}} + (1 - p_{\text{пом}}) * \log_2(1 - p_{\text{пом}})), \quad (3.1)$$

де V_s - швидкість джерела повідомлень і обчислюється за формулою:

$$V_s = tcp_{red} * \Delta F * m * r_k. \quad (3.2)$$

Пропускную здатність C було розраховано за формулою (1.4).

Згідно кожному набору параметрів для різних типів сигнально-кодових конструкцій обчислювалися окремі значення інформаційної ефективності і будувалися графіки.

3.2 Цільовий функціонал для оцінки інформаційної ефективності

Розглянемо ентропію одиночного двійкового символу джерела, яка визначається наступним чином:

$$H = 1 + p_{\delta} \log_2 p_{\delta} + (1 - p_{\delta}) \log_2 (1 - p_{\delta}), \quad (3.3)$$

де p_{δ} – ймовірність помилкового прийому.

Ентропія одиночного двійкового символу джерела (3.3) має вигляд:

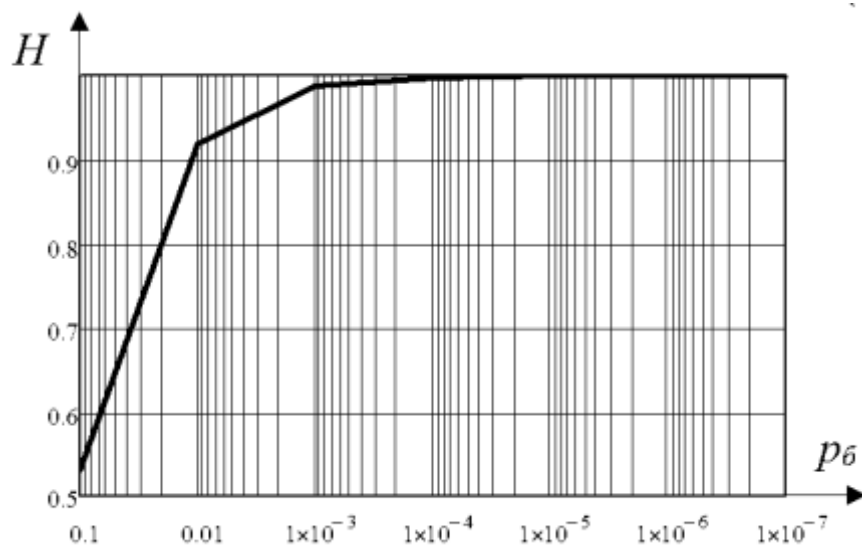


Рисунок.3.1. Ентропія одиночного двійкового символу джерела від ймовірності бітової помилки

Продуктивність дискретного каналу зв'язку пов'язана з ймовірністю помилки в точці прийому і швидкістю джерела в такий спосіб:

$$R_{\delta} = V_s \cdot H, \quad (3.4)$$

де V_s – швидкість джерела інформації, H – ентропія одиночного двійкового символу джерела.

Пропускна здатність безперервного каналу зв'язку визначається наступним чином:

$$C_n = \Delta F \cdot \log_2 (1 + h_{\text{нрм}}^2), \quad (3.5)$$

де ΔF – полоса займаємих частот, $h_{\text{нрм}}^2$ – енергетичний параметр каналу зв'язку

в точці прийому, обчислюється як:

$$h^2 = \frac{P_{\text{прм}} T_0}{N_0} \left[\frac{Bm \cdot \text{сек}}{Bm / \Gamma_{\text{ц}}} = \text{раз} \right], \quad (3.6)$$

де $P_{\text{прм}}$ – потужність сигналу в точці прийому.

Таким чином, ентропія (3.3), а також продуктивність (3.7) дискретного каналу носять пороговий характер і досягають свого максимуму при ймовірності бітової помилки на рівні $p_{\bar{o}} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$, як показано на рис. 3.1. Граничний характер і насичення продуктивності при використанні в бездротовій системі передачі спостерігається для всіх видів багатопозиційної модуляції.

У зв'язку з цим, для максимізації інформаційної ефективності, необхідно прагнути до забезпечення рівня бітової помилки в точці прийому не гірше ніж $p_{\bar{o}} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$.

Імовірність бітової помилки в точці прийому є функцією енергетичного параметра каналу в точці прийому $h_{\text{прм}}^2$ і виду багатопозиційної модуляції, що використовується з параметром $m = \log_2 M$:

$$p_{\bar{o}} = f(h_{\text{прм}}^2, m) \quad (3.7)$$

Таким чином, максимізувати інформаційну ефективність можна в разі прагнення показника інформаційної ефективності η до одиниці, тобто коли продуктивність каналу (3.4) прагне до пропускної спроможності каналу зв'язку (3.5), що здійснюється при досягненні в точці прийому $p_{\bar{o}} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ при використанні деякого виду БПМ, що, в свою чергу, забезпечується при належному рівні енергетики сигналу в точці прийому (3.6).

Швидкість джерела і швидкість в каналі може бути виражено через додаткові характеристики системи передачі:

$$V_s = V_c \cdot r_k \cdot m; \quad m = \log_2 M, \quad (3.8)$$

де V_c - канална швидкість, яка дорівнює полосі займаємих частот, r_k – швидкість завадостійкого кодування, M – число позицій у сузір'ї

багатопозиційної модуляції, m – число біт на символ.

Таким чином, в завданню поліпшення інформаційної ефективності використання ресурсів каналу зв'язку, розглядаються наступні вихідні дані:

- 1) Ресурси каналу зв'язку для передачі інформації:
 - Частотні: обмежена полоса випромінювання, ΔF , МГц;
 - Часові: швидкість передачі символів джерела, $V_s = 1 / T_s$, Мбіт/с;
 - Енергетичні: обмежена швидкість випромінювання, $P_{\text{пер}}$, Вт;
- 2) Вимоги до достовірності прийому інформації: $p_{\text{б_пр}}$;
- 3) Режим випромінювання з використанням OFDM, N_{OFDM} ;
- 4) Многопозиційна модуляція: QPSK, QAM-16, QAM-64: $M = 2^m$;
- 5) Завадостійке кодування з параметрами n, r_k, t .

Цільовий функціонал виглядає наступним чином:

$$\max_{\{\Delta F, P_{\text{пер}}\} \text{ обмежен.}} \eta \quad \left| \begin{array}{l} p_{\text{б_пом}} \\ \text{OFDM} \\ \text{БПМ} \\ \text{завад.код.} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Зміст виразу (3.8) зводиться до того, що потребується досягнути найкращого (максимального) значення інформаційної ефективності η в рамках використання обмежених ресурсів каналу зв'язку $\Delta F, P_{\text{пер}}$, при цьому з задовільненою потрібною достовірністю прийому інформації $p_{\text{б_пр}}$.

Таким чином, забезпечення необхідного рівня енергетики сигналу при фіксованих інших параметрах системи зв'язку дозволяє досягти максимальної інформаційної ефективності бездротової системи передачі.

3.3 Результати оцінки інформаційної ефективності в імітаційній моделі для різних наборів вхідних параметрів

3.3.1 Результати оцінки для наборів вхідних параметрів стандарту IEEE 802.11n

Для оцінки інформаційної ефективності стандарту 802.11n в імітаційній моделі було використано вхідні параметри з пункту роботи 3.1 та таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Вхідні параметри модуляції та швидкості кодування для стандарту 802.11n.

Модуляція	Швидкість кодування
QPSK	1/2
QPSK	3/4
16-QAM	1/2
16-QAM	3/4
64-QAM	2/3
64-QAM	3/4
64-QAM	5/6

Як було сказано раніше у розділі 3.2, для максимізації інформаційної ефективності, необхідно прагнути до забезпечення рівня бітової помилки в точці прийому не гірше ніж $p_b = 10^{-5} \dots 10^{-6}$, тому у розрахунках було обрано найкращий варіант, а саме значення бітової помилки не повинно перевищувати $p_{b_пом} = 10^{-6}$.

Для кожного набору вхідних даних було побудовано залежності значень бітової помилки, пропускної здатності й продуктивності та значення інформаційної ефективності від енергетичного параметру h^2 (рис.3.1).

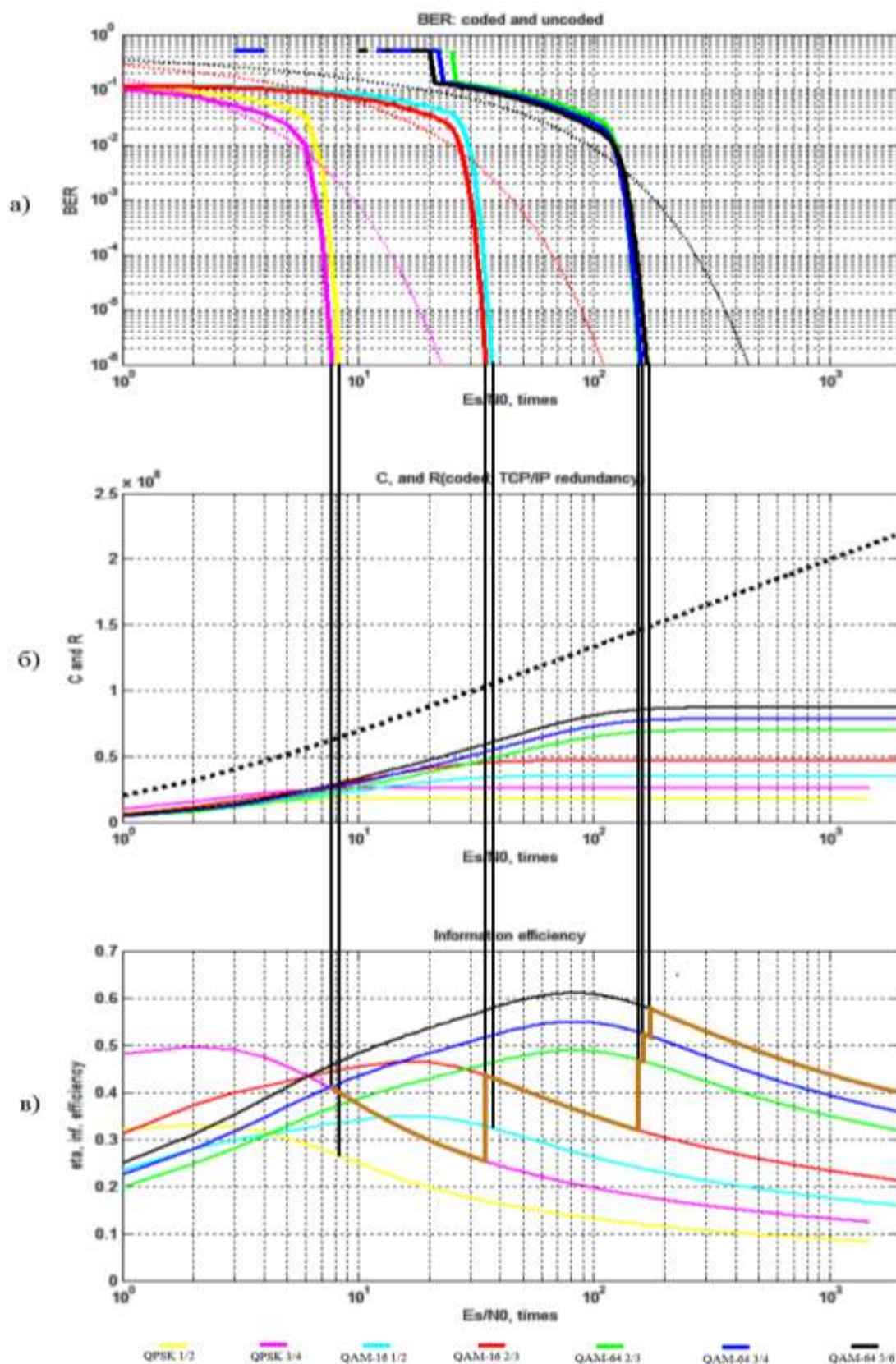


Рисунок 3.2 Залежність величин у стандарті 802.11n від h^2 : а) вірогідності помилки; б) пропускної здатності та продуктивності; в) інформаційної ефективності

Як бачимо з рисунка 3.1а, для кожної пари типу модуляції і швидкості завадостійкого кодування є певні діапазони енергетики, у яких досягається потрібне значення вірогідності бітової помилки.

З рисунка 3.1б можна побачити, що зі зростанням типу модуляції та швидкості кодування підвищується продуктивність каналу. При цьому, чим більша енергетика (параметр h^2), тим помітніше виграш більших значень СКК у продуктивності.

Рисунок 3.1в показує характер зміни кривих інформаційної продуктивності залежно від енергетики. Як бачимо, то значення варіюються від 0.12 до 0.61. Проте, як можна помітити, використання деяких типів на окремих інтервалах відношення сигнал/шум є нецілеобразним, тому що показують низький рівень η .

Так як, усі три графіка мають спільну вісь координат «х», то можемо з рис.3.1а зробити проекцію значень рівня $p_{б_пом} = 10^{-6}$ для всіх СКК на рис.3.2в. Тоді побачимо при вказаному значенні бітової помилки та зафіксованій енергетиці, при якому наборі типу модуляції та швидкості завадостійкого кодування досягається найкращий показник інформаційної ефективності. Також можна зробити висновок, що згідно нашої імітаційної моделі, застосування модуляцій QPSK зі швидкістю кодування 1/2 та QAM-16 зі швидкістю кодування 1/2 не є раціональним, так як вищі номери СКК дають більше значення η при тій самій вірогідності бітової помилки. У зв'язку з цим, можна виділити діапазони відношення сигнал/шум, у яких краще використовувати той, чи інший тип модуляції зі швидкістю кодування для досягнення максимальної інформаційної ефективності. Результати наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Діапазони максимальної інформаційної ефективності

Модуляція	Швидкість кодування	Відношення сигнал/шум	Інформаційна ефективність
QPSK	3/4	8-35	0.41-0.25
QAM-16	2/3	35-156	0.44-0.32
QAM-64	2/3	156-158	0.47-0.46
QAM-64	3/4	158-168	0.53-0.52
QAM-64	5/6	168-...	0.58-...

Згідно даних таблиці 3.2 на графіку 3.2в побудовано криву лінію коричневого коліру, яка показую найкращий варіант переключення сигнально-кодових конструкцій у стандарті 802.11n.

3.3.2 Результати оцінки для наборів вхідних параметрів стандарту IEEE 802.11ac

Для оцінки інформаційної ефективності стандарту 802.11ac в імітаційній моделі було використано вхідні параметри з пункту роботи 3.1 та таблиці 3.3. Усі параметри до модуляції QAM-256 збігаються зі стандартом 802.11n, вони використовуються в такій самій послідовності, тому на них не буду акцентувати увагу.

Таблиця 3.3 Вхідні параметри модуляції та швидкості кодування для стандарту 802.11ac.

Модуляція	Швидкість кодування
QPSK	3/4
16-QAM	3/4
64-QAM	2/3
64-QAM	3/4
64-QAM	5/6
256-QAM	3/4
256-QAM	5/6

Сигнально-кодові конструкції, які ми визначили нераціональними згідно нашої імітаційної моделі у стандарті 802.11n, вже не беруться до уваги. Проте, додалися нові, які не використовуються у попередньому стандарті, а саме: 256-QAM зі швидкістю кодування 3/4 та 256-QAM зі швидкістю кодування 5/6. Криві для значень бітової помилки, пропускну здатності й продуктивності та значення інформаційної ефективності від енергетичного параметру h^2 для них зображені на рис.3.3 жовтою та голубою пунктирними лініями відповідно.

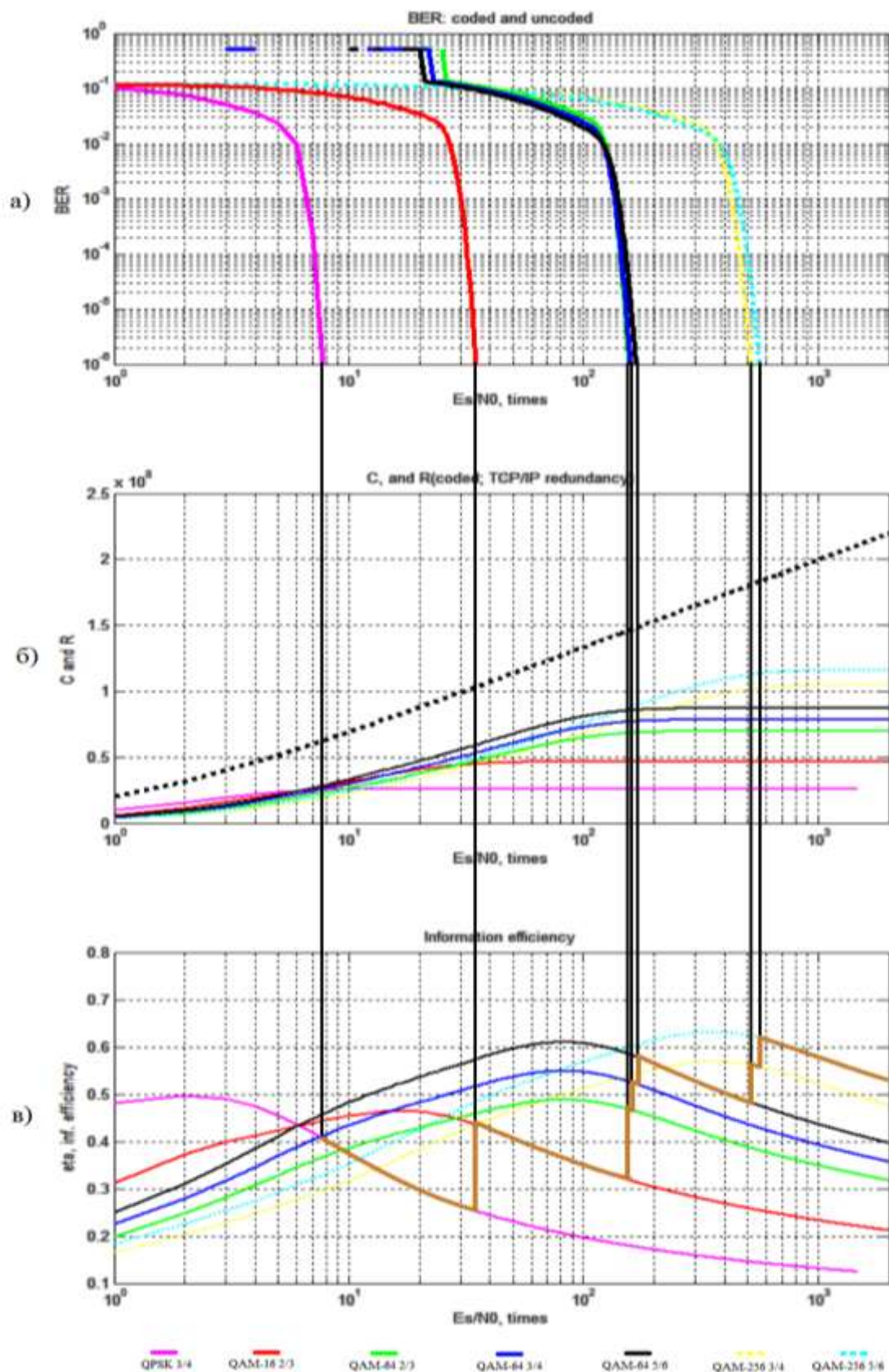


Рисунок 3.3 Залежність величин у стандарті 802.11ac від h^2 : а) вірогідності помилки; б) пропускної здатності та продуктивності; в) інформаційної ефективності

Аналогічно рис. 3.2в можна виділити діапазони відношення сигнал/шум, у яких краще використовувати той, чи інший тип модуляції зі швидкістю кодування для досягнення максимальної інформаційної ефективності. Результати наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 Діапазони максимальної інформаційної ефективності

Модуляція	Швидкість кодування	Відношення сигнал/шум	Інформаційна ефективність
QPSK	3/4	8-35	0.41-0.25
QAM-16	2/3	35-156	0.44-0.32
QAM-64	2/3	156-158	0.47-0.46
QAM-64	3/4	158-168	0.53-0.52
QAM-64	5/6	168-517	0.58-0.49
QAM-256	3/4	517-566	0.57-0.56
QAM-256	5/6	566-...	0.62-...

Так само, як у попередньому розділі, згідно даних таблиці 3.4 на графіку 3.3в побудовано криву лінію коричневого коліру, яка показую найкращий варіант переключення сигнально-кодових конструкцій у стандарті 802.11ac.

Висновки до розділу 3

Даний розділ присвячений побудові та дослідженню імітаційної моделі для оцінки інформаційної ефективності стандартів 802.11n/ac. Імітаційне моделювання - це метод дослідження, при якому система, що вивчається замінюється моделлю, з достатньою точністю описує реальну систему і з якою проводяться експерименти з метою отримання інформації про властивості цієї системи. В якості програмного забезпечення для побудови ІМ було обрано Matlab. Код самої моделі наведений у додатку А. В ній фіксуються вхідні параметри пов'язані з вибраними стандартами, стеком протоколів TCP/IP та засобами безпроводового зв'язку. Для кожного стандарту обирається набір сигнально-кодових конструкцій, тобто набору типу модуляції та швидкості завадостійкого кодування.

Для максимізації інформаційної ефективності, необхідно прагнути до забезпечення рівня бітової помилки в точці прийому не гірше ніж $p_b = 10^{-5} \dots 10^{-6}$, тому у розрахунках було обрано найкращий варіант, а саме значення бітової помилки не повинно перевищувати $p_{b_пом} = 10^{-6}$. Для кожного набору вхідних даних було побудовано залежності значень бітової помилки, пропускної здатності й продуктивності та значення інформаційної ефективності від енергетичного параметру h^2 .

Як результат моделювання отримуємо алгоритм перемикання сигнально-кодових конструкцій залежно від енергетики сигналу для отримання максимальної інформаційної ефективності.

Наступним кроком потрібно провести практичне дослідження на обраних засобах безпроводового зв'язку, що відображено у розділі 4.

РОЗДІЛ 4. Практичне дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802.11n/ас виробника Mikrotik

4.1 Схема випробувань, вимірювані параметри та сценарій дослідження

Для практичного дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів 802.11 було зібрано схему [34], зображену на рис.4.1.

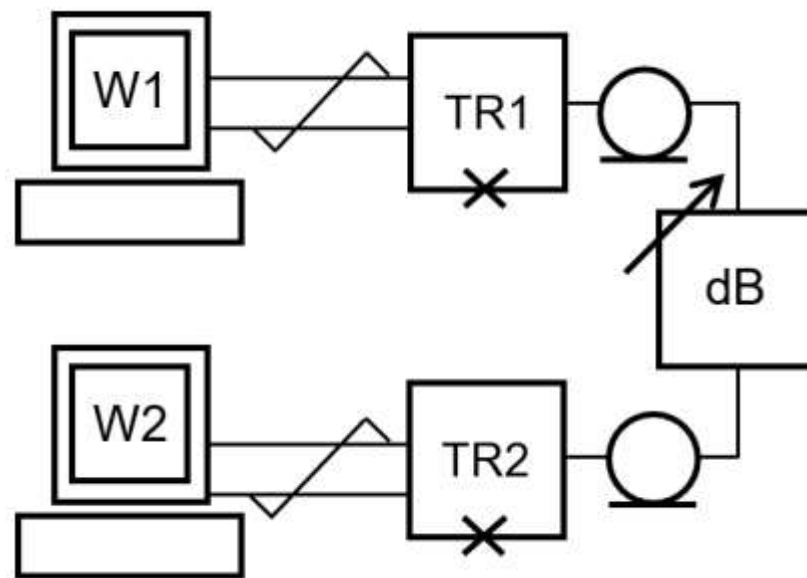


Рисунок 4.1. Схема для практичного дослідження інформаційної ефективності засобів зв'язку

При використанні двох RB / 921UAGS-5SHPasT-N побудована схемою «точка-точка» з імітацією лінії зв'язку на основі аттенюаторів з фіксованим ослабленням 40 дБ і додатковим змінним ослабленням рівня сигналу 20-80 дБ при використанні абонентських терміналів з гігабітним Ethernet портом і роботою по протоколу TCP / IP.

Порядок проведення випробувань в лабораторії:

1. Налаштувати інтерфейси ПК1, ПК2 з гігабітними Ethernet портами як показано на рис. 4.1.

2. Встановити утиліту `iperf` на ПК1 і ПК2 для можливості генерування трафіку TCP і UDP.
3. Підключити приймально-передавальне обладнання, атенюатори, ПК1 і ПК2 як показано на рис. 4.1.
4. Встановити на атенюаторі максимальний рівень ослаблення: 120 дБ.
5. Зайти в управління приймачем з IP-адресою 10.0.0.5 через утиліту WinBox.
6. Переконалися у встановленні зв'язку. Інакше зменшити ослаблення в лінії на 2 дБ.
7. Ініціювати передачу файлу даних великого обсягу (1-2 ГБ) з ПК1 на ПК2 (передача по протоколу TCP) замість використання внутрішнього інструменту WinBox виробника MikroTik, що дозволить розвантажити обчислювальні ресурси приймачів і збільшити їх продуктивність; або ж використовувати утиліту `iperf` для генерування TCP, UDP трафіку між віддаленими точками.
8. Зменшувати ослаблення в лінії на 2 дБ при низькому рівні енергетики на вході приймача ($P_{вх} < -69$ дБм), і фіксувати параметри зв'язку в табл. 4.1: рівень потужності передавача, сумарне загасання в лінії, потужність сигналу на вході приймача, рівень шуму в каналі, ставлення рівня сигналу до рівня шуму.
9. Зменшувати ослаблення в лінії на 2-3 дБ при високому рівні енергетики на вході приймача ($P_{вх} = -69 \dots -29$ дБм) і фіксувати параметри зв'язку в таблицю 4.1.
10. Графічно показати графік інформаційної ефективності, виміряної та підрахованою при передачі TCP трафіку і виміряної при передачі UDP трафіку.

Таблиця 4.1 Результати вимірів параметрів при

TX min, dBm	TX max, dBm	Атт. $A_{\text{сумм}}$, dB	RX, dBm	Noise, dBm	h^2 , dB	Модуля- ція	Швид- кість коду- вання	η
27	33	95	-88	-106	18	QPSK	1/2	0,553
27	33	90	-85	-106	21	QPSK	1/2	0,475
27	33	80	-78	-106	28	QPSK	3/4	0,536
27	33	75	-71	-106	35	QPSK	3/4	0,429
27	33	70	-66	-106	40	QPSK	3/4	0,375
27	33	65	-60	-106	46	QAM16	1/2	0,435
27	33	60	-56	-106	50	QAM16	1/2	0,400
27	33	58	-54	-106	52	QAM16	3/4	0,577
27	33	55	-51	-106	55	QAM16	3/4	0,545
27	33	52	-49	-106	57	QAM16	3/4	0,526
27	33	48	-45	-106	61	QAM64	2/3	0,656
27	33	45	-41	-106	65	QAM64	2/3	0,615
27	33	40	-37	-106	69	QAM64	3/4	0,652
27	33	38	-35	-107	72	QAM64	3/4	0,625
27	33	35	-31	-107	76	QAM64	3/4	0,592
27	33	32	-29	-107	78	QAM64	5/6	0,641
27	33	28	-25	-107	82	QAM64	5/6	0,610
27	33	26	-23	-106	83	QAM256	3/4	0,723
27	33	24	-22	-106	84	QAM256	3/4	0,714
27	33	22	-21	-106	85	QAM256	5/6	0,784
27	33	20	-19	-106	87	QAM256	5/6	0,766

4.2 Результати практичного дослідження інформаційної ефективності

Дослідження одразу проводилися за допомогою стандарту 802.11a, тому що усі типи модуляції і швидкість кодування до QAM-64 5/6 повністю співпадають зі стандартом 802.11n. Згідно отриманим на практиці за допомогою тестової схеми результатам, які вказані у таблиці 4.1, можна побудувати графік залежності показника інформаційної ефективності η від енергетики сигналу h^2 (рис. 4.2).

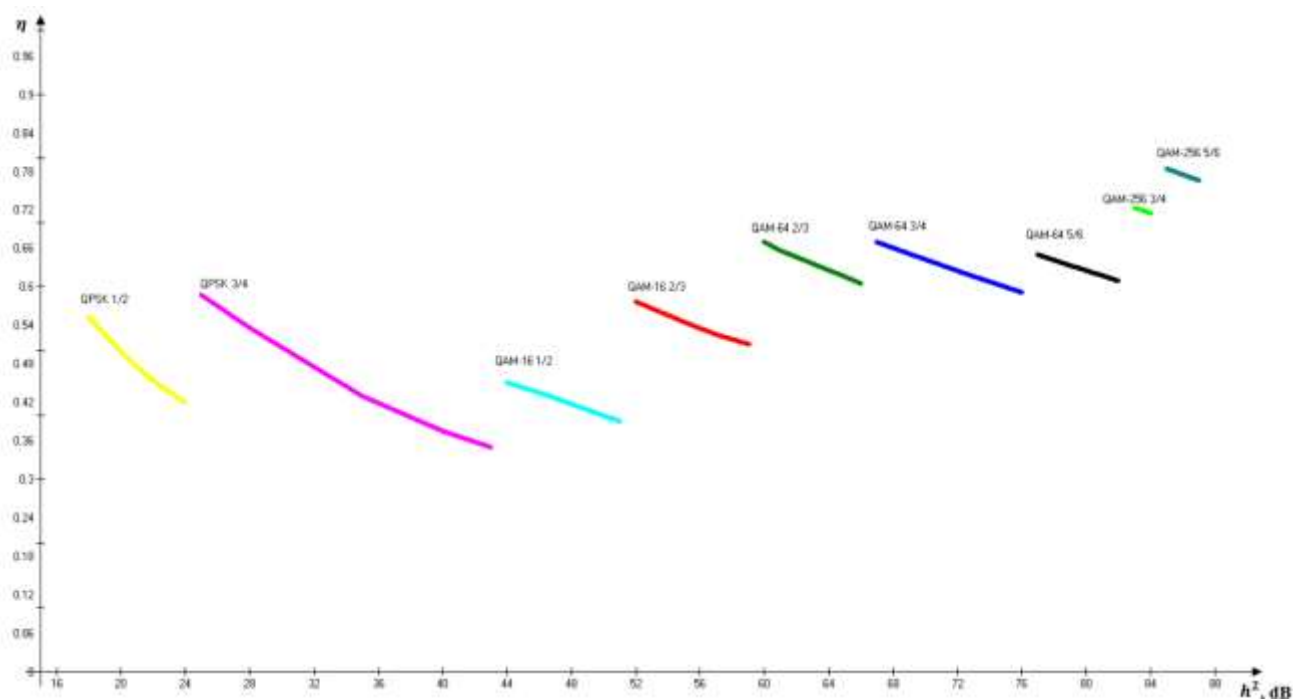


Рисунок 4.2 Графік залежності показника інформаційної ефективності від енергетики сигналу

Як бачимо з рисунка, що зміна рівня інформаційної ефективності має пилообразний характер. При переключенні на наступний тип сигнально-кодової конструкції цей рівень різко зростає, а потім, з підвищенням енергетики поступово знижується.

Також, можна помітити, що як і у випадку з дослідженням за допомогою імітаційної моделі, сигнально-кодові конструкції з наборами параметрів QPSK $1/2$ та QAM-16 $1/2$ показують найнижчі значення інформаційної ефективності.

Висновки до розділу 4

У даному розділі було проведене практичне дослідження інформаційної ефективності безпроводових засобів зв'язку на основі стандартів 802.11n/ac за допомогою зібраної схеми із використанням сучасного обладнання Mikrotik RB/921UAGS-5SHPasT-N, атенюатора та двох комп'ютерів. За допомогою спеціальної утиліти iperf між комп'ютерами передавався трафік, а на атенюаторі поступово, з невеликим кроком змінювалися затухання. Таким чином, обчислено рівень інформаційної ефективності залежно від рівня енергетики та сигнально-кової конструкції, що використовується та побудовано графік цієї залежності. Дослідження проводилися тільки зі стандартом 802.11n, адже він включає у себе усі СКК стандарту 802.11n.

Наступним кроком потрібно провести порівняння результатів, отриманих за допомогою імітаційної моделі та практичних результатів, що і буде висвітлено у розділі 5.

РОЗДІЛ 5. Шляхи підвищення інформаційної ефективності безпроводових систем передачі

5.1 Порівняння результатів практичного дослідження та теоретичної оцінки інформаційної ефективності засобів зв'язку на основі стандартів IEEE 802n/ac

Якщо порівняти результати практичного дослідження та теоретичної оцінки інформаційної ефективності, то можна сказати, що ми отримали приблизно однакове відображення залежності параметру η від сигнально-кової конструкції, що використовується. Це свідчить про адекватність нашої імітаційної моделі. При заданій вірогідності помилки $p_{\text{пом}} = 10^{-6}$ діапазон зміни інформаційної ефективності в ІМ був 0.25-0.62, а в практичній частині – 0.375-0.784, що є дуже наближеними між собою. При цьому обидва рази показали, що є певні діапазони, у яких найраціональніше використовувати певний тип сигнально-кової конструкції.

Як і очікувалися, обидва методи показали, що зі збільшенням модуляції та швидкості завадостійкого кодування зростає значення інформаційної ефективності. Проте, це спостерігається лише у певних енергетичних діапазонах.

Також, можна побачити, що сигнально-кові конструкції з наборами параметрів QPSK 1/2 та QAM-16 1/2 показують найнижчі значення інформаційної ефективності – це показали обидва дослідження.

Незважаючи на таку схожість результатів, були і розбіжності. Насамперед, вони пов'язані з енергетичним параметром h^2 . У випадку з експериментальним дослідженням він був у рази більше по відношенню до теоретичного дослідження. Це можна пояснити не повною відповідністю імітаційної моделі реальним умовам та можливими похибками у розрахунках.

5.2 Пропозиції підвищення інформаційної ефективності безпроводових систем передавання інформації на основі стандартів IEEE 802.11n/ac

Згідно результатів дослідження, можна прийти до висновку, що алгоритми зміни сигнально-кодових конструкцій не є оптимальним згідно критерію досягання максимальної інформаційної ефективності. Нажаль, точний алгоритм невідомий і змінити його немає можливості, результати які ми отримали не є стовідсотково справедливими, проте вони дають можливість з певною вірогідністю робити деякі пропозиції.

У зв'язку з тим, що при обох дослідженнях було виявлено, що сигнально-кодові конструкції з наборами параметрів QPSK 1/2 та QAM-16 1/2 показують найнижчі значення інформаційної ефективності, то треба зменшити енергетичні діапазони, у яких вони використовуються, або навіть виключити їх взагалі з алгоритму.

Також, через те, що вищі сигнально-кодові конструкції забезпечують кращу інформаційну ефективність, то потрібно розглянути варіант швидшого переключення на них, коли це дозволяється енергетикою.

Оскільки у роботі було сказано, що для максимізації інформаційної ефективності, необхідно прагнути до забезпечення рівня бітової помилки в точці прийому не гірше ніж $p_b = 10^{-5} \dots 10^{-6}$, а у розрахунках було обрано найкращий варіант, а саме значення бітової помилки не перевищувало $p_{b_пом} = 10^{-6}$, то збільшення вірогідності до $p_b = 10^{-5}$ дозволяє нам виконати обидва запропоновані варіанти.

Для підвищення показника інформаційної ефективності також можуть бути застосовані більш швидке завадостійке кодування та вищі типи модуляції.

Проте, ці припущення потребують більшої кількості досліджень, в тому числі і за допомогою інших засобів безпроводового зв'язку стандартів IEEE 802.11n/ac.

Висновки до розділу 5

У даному розділі було проведено порівняння результатів досліджень за допомогою імітаційної моделі у програмному середовищі Matlab та експериментальної схеми топології «точка-точка» на основі сучасного обладнання Mikrotik. Було виділено схожість отриманих результатів, що вказує на доречне дослідження за допомогою імітаційних моделей. Проте, як і очікувалося, повної відповідності у результатах не було, що ми пов'язали з не повною відповідністю імітаційної моделі реальним умовам та можливими похибками у розрахунках.

Незважаючи на деякі розбіжності у дослідженнях, все одно було зроблено висновки, що алгоритм зміни сигнально-кодових конструкцій у стандартах 802.11n/ac не є ідеальним і він потребує деякого корегування. Нами було зроблено припущення, що для цього потрібно зменшити використання двох СКК QPSK 1/2 та QAM-16 1/2, а також «пришвидшити» зміну сигнально кодових конструкцій на більш високі. Усе це спричинить можливе підвищення вірогідності бітової помилки, але лише до рівня, який є допустимим у безпроводовому зв'язку. Також відзначалася можливість застосування більш швидкого завадостійкого кодування та вищих типів модуляції.

Усі ці припущення можна вважати справедливими, проте вони потребують додаткового дослідження.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день суспільство оточило себе технологіями та використовує їх у кожній сфері своєї діяльності. Мобільність засобів зв'язку дозволяє людям отримувати та передавати інформацію у будь-якому місці, неважливо будь то вдома чи у суспільних місцях. Проте, в умовах обмежених ресурсів каналів зв'язку, а саме частотних та енергетичних, постає питання про отримання інформації якнайшвидше.

В даній роботі було розглянуто еволюцію безпроводового зв'язку та відзначено безпосереднє місце стандартів IEEE 802.11 у сучасних телекомунікаціях. Було розглянуто переваги безпроводових мереж над проводовими та обґрунтовано доцільність їх використання. Було також обрано критерій ефективності використання ресурсів каналу, який описується показником інформаційної ефективності, який являє собою відношення продуктивності до пропускної здатності каналу зв'язку. Цей коефіцієнт може виражатися через два показники: частотної ефективності бездротової системи передачі, або коефіцієнт використання смуги частот каналу та показник енергетичної ефективності бездротової системи передачі, або коефіцієнт використання потужності сигналу. Для досягнення високого показника інформаційної ефективності необхідно оперувати оптимальним вибором сигнально-кодових конструкцій, які призначені передавати при заданих умовах каналу зв'язку найкращі поєднання швидкості та достовірності.

Також у даній роботі було детально розглянуто стандарти IEEE 802.11, проведене їх порівняння та виділення 802.11n/ac як передових сучасних стандартів. Вони забезпечують високі швидкості передачі, яких достатньо для всіх видів послуг та трафіку, тим самим роблячи себе найпоширенішими на сьогоднішній день.

Для теоретичної оцінки інформаційної ефективності було побудовано імітаційну модель у програмному забезпеченні MATLAB. Імітаційне моделювання - це метод дослідження, при якому система, що вивчається замінюється

моделлю, з достатньою точністю описує реальну систему і з якою проводяться експерименти з метою отримання інформації про властивості цієї системи. Код самої моделі наведений у додатку А. В ній фіксуються вхідні параметри пов'язані з вибраними стандартами, стеком протоколів TCP/IP та засобами безпроводового зв'язку. Для кожного стандарту обирається набір сигнально-кодових конструкцій, тобто набору типу модуляції та швидкості завадостійкого кодування.

Для максимізації інформаційної ефективності, необхідно прагнути до забезпечення рівня бітової помилки в точці прийому не гірше ніж $p_{\delta} = 10^{-5} \dots 10^{-6}$, тому у розрахунках було обрано найкращий варіант, а саме значення бітової помилки не повинно перевищувати $p_{\delta_пом} = 10^{-6}$. Для кожного набору вхідних даних було побудовано залежності значень бітової помилки, пропускної здатності й продуктивності та значення інформаційної ефективності від енергетичного параметру h^2 .

Як результат моделювання, ми отримали певний алгоритм перемикання сигнально-кодових конструкцій залежно від енергетики сигналу для отримання максимальної інформаційної ефективності.

Окрім теоретичного дослідження, було проведено і практичне. Нам потрібно було зібрати експериментальну схему. Для цього було проаналізовано сучасний ринок засобів безпроводового зв'язку, оглянуто наявних на сьогоднішній день вендорів та перелічено характеристики, якими вони відрізняються. Таким чином, в якості обладнання, що буде використовуватися в практичному дослідженні було обрано MikroTik RouterBoard Groove A-52HPn – безпроводна точка доступу, що працює в безпроводних стандартах 802.11 a/b/g/n із канальною швидкістю до 150 Мбіт/с. Дана точка доступу відповідає критеріям пошуку, що нами ставилися, а саме: середня вартість безпроводових засобів зв'язку; підтримка стандартів IEEE 802.11; можливість спостереження за детальними характеристиками сигналів, що передаються; гнучке налаштування параметрів передачі сигналів.

Схема дослідження представляла собою підключення «точка-точка» з імітацією лінії зв'язку на основі аттенюаторів з фіксованим ослабленням 40 дБ і додатковим змінним ослабленням рівня сигналу 20-80 дБ при використанні абонентських терміналів з гігабітним Ethernet портом і роботою по протоколу TCP / IP. Поступова зміна затухання в лінії дозволила нам відслідкувати алгоритм перемикання сигнально-кодових конструкцій залежно від енергетики. Далі було підраховано рівень інформаційної ефективності залежно від рівня енергетики та сигнально-кової конструкції, що використовується та побудовано графік цієї залежності.

В останньому розділі було проведено порівняння результатів досліджень за допомогою імітаційної моделі у програмному середовищі Matlab та експериментальної схеми. Спостерігається схожість отриманих результатів, що вказує на доречне дослідження за допомогою імітаційних моделей. Проте, як і очікувалося, повної відповідності у результатах не було, що ми пов'язали з не повною відповідністю імітаційної моделі реальним умовам та можливими похибками у розрахунках.

У зв'язку з тим, що в обох дослідженнях було показано, що алгоритм зміни сигнально-кодових конструкцій у стандартах 802.11n/ac не є ідеальним і він потребує деякого корегування, нами було зроблено припущення, що для цього потрібно зменшити використання двох СКК QPSK 1/2 та QAM-16 1/2, а також «пришвидшити» зміну сигнально кодових конструкцій на більш високі. Усе це спричинить можливе підвищення вірогідності бітової помилки, але лише до рівня, який є допустимим у безпроводовому зв'язку. Також відзначалася можливість застосування більш швидкого завадостійкого кодування та вищих типів модуляції.

Таким чином, можна сказати, що мета та задачі роботи виконані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скляр О. К. С 43 Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное пособие. 2 е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 272 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).
2. Эволюция систем передачи информации [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://olacom.ru/jevoljucija-sistem-peredachi.html>.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2010. – 916 с. 4 вид.
4. Развитие сотовых сетей радиосвязи с подвижными объектами [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://mir-znaniy.com/a/120357/razvitie-sotovykh-setey-radiosvyazi-s-podvizhnymi-obektami>.
5. Сети LTE, структура и принцип работы [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.mobile-networks.ru/articles/seti_lte_struktura_i_princip_raboty.html.
6. Эволюция мобильных сетей. От 1G до LTE [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://internetua.com/evoluaciya-mobilnih-setei--ot-1G-do-LTE>.
7. Джим Гейер. Беспроводные сети. Первый шаг: Пер. с англ. — М. : Издательский дом "Вильямс", 2005. — 192 с.: ил. — Парал.тит. англ.
8. Беспроводные сети Wireless LAN - Описание стандартов. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.communet.ru/scs/wireless/standart.htm>.
9. Бездротові локальні мережі Wlan (wi-fi) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://ukrbukva.net/page,2,68947-Besprovodnye-lokalnye-seti-Wlan-wi-fi.html>.
10. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Т18 Компьютерные сети. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2012. — 960 с.: ил.

- 11.Осипчук С.А. Повышение информационной эффективности беспроводных систем передачи на основе перераспределения ресурсов канала связи: Дис. канд. техн. наук / Осипчук С.А .., 2015 - 182 с.
12. Зюко А. Г. помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] /А. Г. Зюко // втором изд., Перераб. и доп. - М.: Связь, 1972. - 360 с.
13. *Shannon C. E. A mathematical Theory of Communication [Text] / C. E. Shannon. – The Bell System Technical Journal, vol. 27., 1948. – pp. 379–423, 623–656.*
14. *Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] / А. Г. Зюко // 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Связь, 1972. – 360 с.*
- 15.Гольдштейн Б. С., Соколов Н. А., Яновский Г.Г. Сети связи. - СПб.: «БХВ – Петербург», 2010. – 400 с.
16. *Урывский Л. А. Основы прикладной теории информации для телекоммуникаций [Текст] : диссертация доктора технических наук : 05.12.02 / Л. А. Урывский; Киев, НТУУ «КПИ». – К. : 2009. – 377 с.*
17. Вишневский В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: «Техносфера», 2009. – 472 с.
- 18.Стандарты интерфейса Wi-Fi [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.starlink.ru/articles/wi-fi-standarts/>.
- 19.Частотные полосы и каналы Wi-Fi [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-frequency-bands-and-channels>.
20. Рішення №18 від 12.01.2012 Про схвалення узагальнених умов застосування радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв Додаток 9-10, про мощности излучения <http://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=38&id=805&language=uk>
- 21.Теория электрической связи: учебное пособие / К.К. Васильев, В.А. Глушков, А.В. Дормидонтов, А.Г. Нестеренко;под общ. ред. К.К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с. http://sernam.ru/book_tec.php

22. IEEE Standard for Information technology 802.11n: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>.
23. Harri Holma, Antti Toskala. HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications. – Gardners Books, 2006.- p. 268.
24. Dr. Haohong Wang, Dr. Lisimachos P. Kondi, Dr. Ajay Luthra, Dr. Song Ci. 4G Wireless Video Communications.- John wiley & Sons Ltd., 2009. – p. 389.
25. Martin Sauter. Beyond 3G – Bringing Networks, Terminals and the Web Together. - John wiley & Sons Ltd., 2009. – p. 366.
26. Ajay R. Mishra. Cellular Technologies for Emerging Markets 2G, 3G, and Beyond. - John wiley & Sons Ltd., 2010. – p. 326.
27. IEEE Standard for Information technology 802.11ac: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11ac-2013.html>
28. SeungJune Yi, SungDuck Chun, YoungDae Lee, SungJun Park, SungHoon Jung. Radio Protocols for LTE and LTE-Advanced. - John Wiley & Sons, 2012, p.344.
29. Christophe Chevallier , Christopher Brunner , Andrea Garavaglia, Kevin P. Murray, Kenneth R. Baker. WCDMA Deployment Handbook. - John Wiley & Sons, 2006, p.412.
30. Основные особенности стандарта 802.11ac [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/company/cbs/blog/274267/>.
31. Mikrotik NetMetal 5 (RB921UAGS-5SHPaCT-NM) Источник: <https://lan-torg.com/products/mikrotik-netmetal-5-rb921uags-5shpact-nm> © Lan-Torg.com [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://lan-torg.com/products/mikrotik-netmetal-5-rb921uags-5shpact-nm>.
32. Лекції Уривського Л.О. з дисципліни «Імітаційне моделювання», НТУУ «КПІ ім.І.Сікорського», 2017 рік.

33. Уривский Л.А., Осипчук С.А., Чекунов Н.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СТАНДАРТА 802.11n / Електронне наукове фахове видання – журнал «Проблеми телекомунікацій». – 2017
34. Uryvsky L., MOshynska A., Osypchuk S. Applied research of Modulation-Coding Schemes selection algorithms effectiveness in 802.11 equipment

ДОДАТОК А

КОД ПРОГРАМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙОЇ ЕФЕКТИВНО-
СТІ СТАНДАРТИВ 802.11 N/AC У ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕНІ
MATLAB

```

for modulation=2:1:8
    for modulation_cases=1:1:1 % modulation_cases
        if modulation == 2 %QPSK
            m = 2;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 1/2;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS
            k_code = 128;    % antinoise code, k - RS
        else if modulation == 3 %QPSK
            m = 2;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 3/4;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS
            k_code = 192;    % antinoise code, k - RS
        else if modulation == 4 %QAM-16
            m = 4;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 1/2;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS
            k_code = 128;    % antinoise code, k - RS
        else if modulation == 5 %QAM-16
            m = 4;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 2/3;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS
            k_code = 170;    % antinoise code, k - RS
        else if modulation == 6 %QAM-64
            m = 6;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 2/3;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS
            k_code = 170;    % antinoise code, k - RS
        else if modulation == 7 %QAM-64
            m = 6;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 3/4;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS
            k_code = 192;    % antinoise code, k - RS
        else if modulation == 8 %QAM-64
            m = 6;           % for QAM: bits per symbol
            rk = 5/6;        % RS coding rate; rk = k / n
            n_code = 255;    % antinoise code, n - RS

```

```

        k_code = 212;      % antinoise code, k - RS
    end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

for init_params=1:1:1

    tcpip_redund = 0.87; % TCP/IP redundancy - 13% minimum !!!

    dF = 20 * 10^6;      % the frequency band
    max_raz_SNR_value=2000;
    N0_dBm = -100;        % let's assume N0 in dBm

    N0_W = ( 10^(0.1*N0_dBm) ) / 1000; % N0 in W

    Pt_dBm = 33; % keeping it static % 33 dBm = 2 W % Mikrotik transmitter power
    Pt_W = ( 10^(0.1*Pt_dBm) ) / 1000; % W

    QAM_M = 2^m;      % QAM-M
    Gt_dB = 16;        % transmitter antenna
    Gt_raz = 10^(0.1*Gt_dB);
    Gr_dB = 16;        % receiver antenna
    Gr_raz = 10^(0.1*Gr_dB);
    l_speed_m = 299792458; % light speed, meters per second
    c_freq_Hz = 5.2 * 10^9; % central frequency, Hz, 5 GHz
    lambda_m = l_speed_m / c_freq_Hz; % wave length, meters
    k_att = Gt_raz * Gr_raz * ( lambda_m / (4*pi) )^2;

    % min_sensitivity = -79; % dBm - from table - not used
    Vs = tcpip_redund * dF * m * rk;

end % init_params

for data_calculation=1:1:1

```

```

% Vs = dF * m * rk;
% R = Vs * ( 1 + BER*log2(BER) + (1-BER)*log2(1-BER) );

R_Matrix = zeros(max_raz_SNR_value+1,10);

% R_Matrix explained:
% 1 EsN0 raz
% 2 EsN0 dB
% 3 EbN0 dB
% 4 C
% 5 BER
% 6 R
% 7 eta = R/C = inf_eff
% 8 L, distance, meters - L vs h2 calculation
% 9 Pr, dBm vs L calculation
% 10 BER - coded value

for counter=1:max_raz_SNR_value+1
    current_EsN0_raz = counter - 1;          % 1 - EsN0 raz
    R_Matrix(counter,1) = current_EsN0_raz;
    current_EsN0_dB = 10 * log10(current_EsN0_raz); % 2 - EsN0 dB
    R_Matrix(counter,2) = current_EsN0_dB;
    current_EbN0_dB = current_EsN0_dB - 10*log10(m); % 3 - EbN0 dB for berawgn
    R_Matrix(counter,3) = current_EbN0_dB;
    C = dF * log2(1 + current_EsN0_raz);      % 4 - C
    R_Matrix(counter,4) = C;
    BER = berawgn(current_EbN0_dB,'qam',QAM_M); % 5 - BER
    R_Matrix(counter,5) = BER;
    R = Vs * ( 1 + BER*log2(BER) + (1-BER)*log2(1-BER) ); % 6 - R
    R_Matrix(counter,6) = R;
    inf_eff = R / C;                          % 7 - eta, inf_eff
    R_Matrix(counter,7) = inf_eff;
    L = sqrt( ...
        ( k_att * Pt_W ) / ...
        ( N0_W * dF * current_EsN0_raz ) ...
    ); % 8 - L vs h2 calculation
    R_Matrix(counter,8) = L;
    Pr = 10*log10( k_att / (L^2) ) + Pt_dBm; % 9 - Pr, dBm vs L calculation
    R_Matrix(counter,9) = Pr;
    BER_coded = bercoding(current_EbN0_dB,'RS','hard',n_code,k_code,'qam',QAM_M); % 10 - coded BER

```

```

        R_Matrix(counter,10) = BER_coded;
    end

end % data_calculation

for graphs_plot=1:1:1
%%
    subplot(3,1,1),      %figure BER uncoded and uncoded
    if modulation == 2
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'y-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'y-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    else if modulation == 3
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'m-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'m-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    else if modulation == 4
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'c-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'c-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    else if modulation == 5
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'r-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'r-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    else if modulation == 6
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'g-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'g-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    else if modulation == 7
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'b-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'b-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    else if modulation == 8
        plot_BER_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,5),'k-');
        set(plot_BER_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
    end
end

```



```

        plot_BER_coded_QAMmod = loglog(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,10),'k-');
        set(plot_BER_coded_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
        end
        end
        end
        end
    end
end
end
title ('BER: coded and uncoded');
    xlabel('Es/N0, times');
    ylabel('BER');
    ylim([10^-6 1]);
    xlim([0 max_raz_SNR_value]);
    grid on; hold on;
%%
subplot(3,1,2),    %figure C, R
    plot_C_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,4),'k');
    set(plot_C_QAMmod, 'LineWidth', 3); hold on;
    if modulation == 2
        plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'y-');
        set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
    else if modulation == 3
        plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'m-');
        set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
    else if modulation == 4
        plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'c-');
        set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
    else if modulation == 5
        plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'r-');
        set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        else if modulation == 6
            plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'g-');
            set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        else if modulation == 7
            plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'b-');
            set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        else if modulation == 8
            plot_R_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,6),'k-');
            set(plot_R_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
end
end
title ('C, and R(coded; TCP/IP redundancy)');
    xlabel('Es/N0, times');
    ylabel('C and R');
    xlim([0 max_raz_SNR_value]);
    grid on; hold on;
%%
subplot(3,1,3),      %figure % inf_eff
if modulation == 2
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'y-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
else if modulation == 3
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'m-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
else if modulation == 4
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'c-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
else if modulation == 5
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'r-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
    else if modulation == 6
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'g-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
else if modulation == 7
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'b-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
else if modulation == 8
    plot_eta_QAMmod = semilogx(R_Matrix(:,1),R_Matrix(:,7),'k-');
    set(plot_eta_QAMmod, 'LineWidth', 2); hold on;
        end
        end
        end
    end
end
end
title ('Information efficiency');
    xlabel('Es/N0, times');
```

```
        ylabel('eta, inf. efficiency');  
        xlim([0 max_raz_SNR_value]);  
        grid on; hold on;  
    end % graphs_plot  
end
```